LES INDISPENSABLES
SCIENCES ET AVENIR

ALAIN ASPECT
PRIX NOBEL DE PHYSIQUE 2022
« La révolution quantique est loin d'être terminée ! »

La grande histoire de la PHYSIQUE

Au commencement étaient les Grecs

Cinq expériences qui ont changé le monde

Les carnets de laboratoire de Marie Curie

La bombe atomique, péché mortel des physiciens

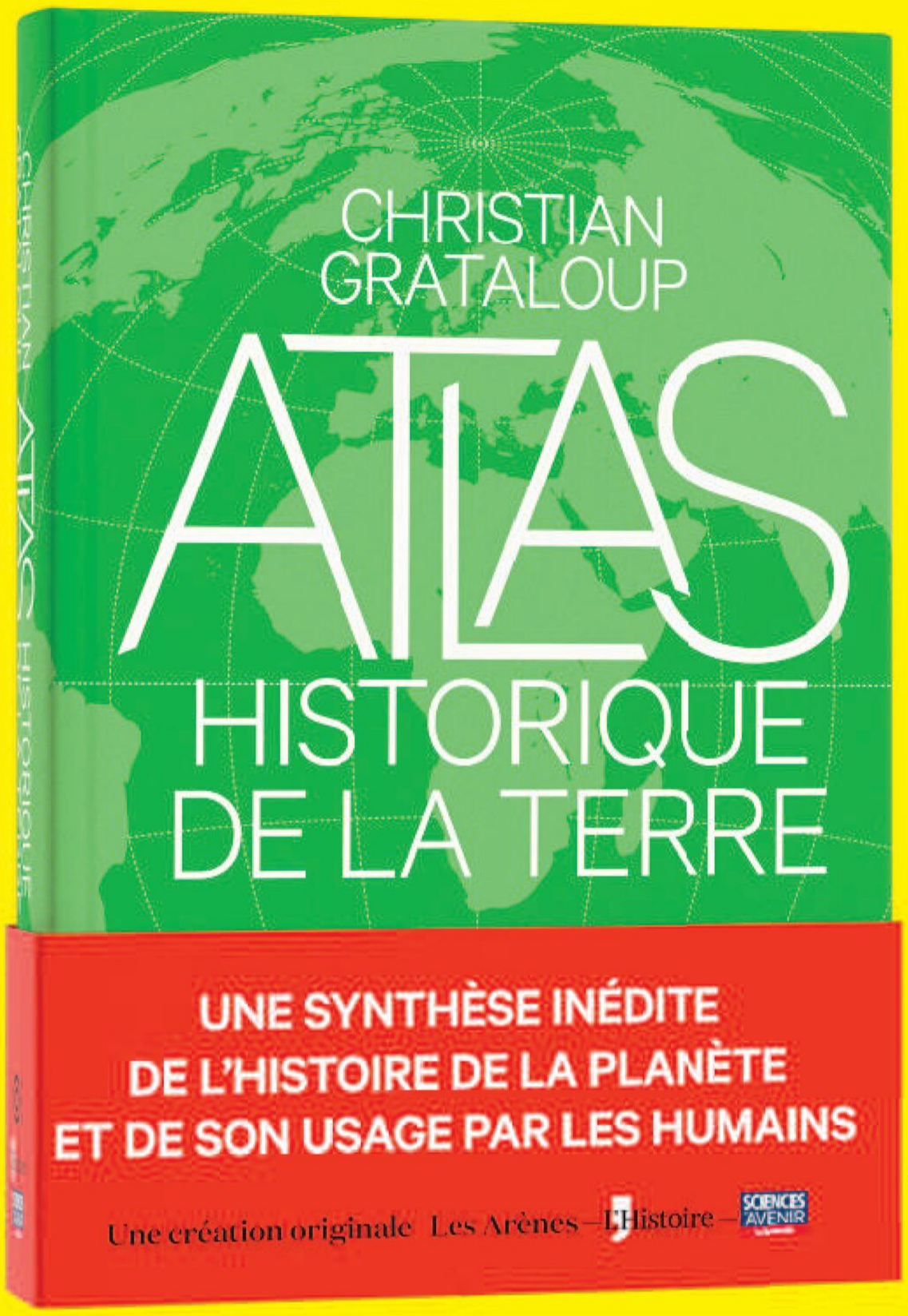
Anaximandre et la pluie, l'audace intellectuelle de Galilée, Newton l'alchimiste, les erreurs d'Einstein…
Un entretien exclusif avec **CARLO ROVELLI,** physicien et historien des sciences

LES INDISPENSABLES DE SCIENCES ET AVENIR - NUMÉRO SPÉCIAL 212 JANVIER/MARS 2023 - LA GRANDE HISTOIRE DE LA PHYSIQUE
NUMÉRO SPÉCIAL 212 JANVIER/MARS 2023 - ALLEMAGNE 8.00 € / BELGIQUE : 6.10€ / GRÈCE : 6.20€ / ESPAGNE : 6.20 € / ITALIE : 6.20 € / DOM: 6.20€ / LUXEMBOURG : 6.10 € / PORTUGAL CONT : 6.20 € / TOM S : 860 XPF / TOM AVION : 1600 XPF / SUISSE : 9.80 CHF / TUNISIE : 10 TND / MAROC : 60 MAD / CANADA : 9.49 $CAD
L 13667 - 212 H - F: 5,90 € - RD

JOEL SAGET / AFP ; SPL/SUCRÉ SALÉ ; ; BRIDGEMAN IMAGES ; LIBRARY OF CONGRESS ; ; COLE BURSTON/AFP POUR SCIENCES ET AVENIR/LA RECHERCHE

La Terre a 4,5 milliards d'années, voici son histoire !

NOUVEAUTÉ
Sortie en librairie le 6 octobre



- **300 cartes et infographies inédites.**
  En s'appuyant sur une équipe d'historiens, de scientifiques et de cartographes de premier plan, Christian Grataloup réalise un atlas accessible à tous, à la pointe de la recherche.
- **Un outil indispensable pour comprendre d'où nous venons et où nous allons.**

340 pages - 29,90 €

L'Histoire · Les Arènes · Sciences Avenir La Recherche

Infographies
Tableaux, graphiques et infographies pour rendre plus accessibles certaines réalités historiques.

Cartes en grand format

Cartes numérisées
Possibilité de télécharger les cartes au format PDF. Un outil pédagogique indispensable, du collège à l'université.

Texte d'accompagnement
Une contextualisation historique ou scientifique indispensable.

Illustrations et schémas

Sommaire

SPL/SUCRÉ SALÉ

Copernic ou l'aurore d'un grand chambardement P. 22

PHOTO JOSSE/BRIDGEMAN IMAGES

Contre les mythes, l'éclosion de la raison P. 18

SPL/SUCRÉ SALÉ

L'épopée du photon ou la double nature de la lumière P. 50

DARCHIVIO/OPALE.PHOTO

Les congrès Solvay ou l'internationale des génies P. 70

DOMAINE PUBLIC

Vingt-quatre siècles pour mesurer la Terre P. 56

5 **Édito**

6 RENCONTRE

CARLO ROVELLI
« Pour Galilée, la physique d'Aristote est bonne, mais pas assez »

10 CHRONOLOGIE

16 RÉVOLUTIONS

18 Contre les mythes, l'éclosion de la raison

22 Copernic ou l'aurore d'un grand chambardement

26 Comment Einstein, en dix mois, changea la face du monde

29 **INTERVIEW ALAIN ASPECT**
« La théorie quantique, la plus fructueuse de l'histoire de la physique »

32 Le projet Manhattan ou la fin de l'innocence

34 Cinq expériences pour comprendre le monde

38 Aux origines orientales de la physique moderne

42 PORTFOLIO
Cabinet de curiosités : les instruments du savoir

48 OBJETS DE SCIENCE

50 L'épopée du photon ou la double nature de la lumière

54 Les pionniers du son et leurs drôles de machines

56 Vingt-quatre siècles pour mesurer la Terre

58 Quand la chaleur met les savants en ébullition

60 Les arpenteurs du Cosmos à l'assaut de la voûte céleste

62 LES OUTILS DU PHYSICIEN

64 Les mathématiques, efficace langage de la physique

68 La réalité dévoilée par la seule force de la pensée

70 Les congrès Solvay ou l'internationale des génies

72 Dans les petits papiers de Marie Curie

74 *Errare scientificum est* ou les faux pas de la science

77 Qu'est-ce qui ne tourne pas rond chez les platistes ?

78 Des démonstrateurs aux blogueurs, quatre siècles de vulgarisation

82 LA SCIENCE SUR ÉCRAN

Kinedo

La **sécurité** sans compromis
mais pas à n'importe quel prix !

Remplacez votre baignoire
par une **douche sécurisée** à un **budget maîtrisé.**

Modèle présenté : Kinemagic Access en angle - version mécanique - porte coulissante
option : siège (+ 337 € TTC)

Douche
Kinemagic

100% sécurisé

Pose en 24h sans gros travaux

Devis gratuit

Le vrai luxe à partir de **3 107 € TTC*** hors pose

*TVA à 10 %, applicable dans le cadre d'une installation par un professionnel

VU À LA TV

Kinedo
C'est bon pour le dos

PLUS D'INFORMATIONS

par téléphone
0 800 05 06 07 Service & appel gratuits

par internet
www.kinedo.com

par courrier
en retournant le coupon ci-joint
Coupon à envoyer à :
AQUAPRODUCTION
LIBRE RÉPONSE 51045
44680 SAINTE PAZANNE

❑ Oui, je souhaite en savoir plus sur la douche Kinemagic et bénéficier d'un **DEVIS GRATUIT** sans engagement de ma part.

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

CP : ..... Ville : .....

Téléphone : .....

Email : .....

N'affranchissez pas ce courrier, nous vous offrons les frais postaux.

Kinemagic - Les Indispensables Sciences & Avenir

LES INDISPENSABLES
SCIENCES ET AVENIR

NUMÉRO SPÉCIAL
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
redaction@sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale
Dominique LEGLU 56.02
Rédacteur en chef Sciences et Avenir
Mathieu NOWAK 56.38
Rédacteur en chef La Recherche
Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR 56.15

Rédaction en chef hors-série Vincent REA 56.35
Florence LEROY 56.36
Directrice artistique Thalia STANLEY 56.21
Photo-iconographie Andreina DE BEI
(rédactrice en chef adjointe) 56.31
Isabelle TIRANT 56.32
Documentation Astrid SAINT AUGUSTE 56.48

Ont collaboré à ce numéro :
Jacques-Olivier BARUCH, Bruno BOURGEOIS, Marie-Amélie CARPIO, René CUILLIERIER, Marine CYGLER, Denis DELBECQ, François FOLLIET, Roland GARRIGUE, Sylvain GUILBAUD, Jean-François HAÏT, Nicolas HALLEUR, Valérie HANDWEILER, Léna HESPEL, Marie PARRA, Françoise ROUX, William ROWE-PIRRA, Vahé TER MINASSIAN, Pierre VANDEGINSTE

Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79. Courriel : l'initiale du prénom puis nom suivi de @ mediaobs.com
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directeur de publicité Emmanuel LALA - 01.44.88.89.28
Exécution Cédric AUBRY - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable des abonnements Lina QUACH 01.55.35.56.63

Les Éditions Croque Futur
Président, directeur de la publication
Claude PERDRIEL
Directeur général Philippe MENAT
Directeur éditorial Maurice SZAFRAN
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL

Abonnements et anciens numéros : 01.55.56.71.48
4, rue de Mouchy
60438 Noailles Cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

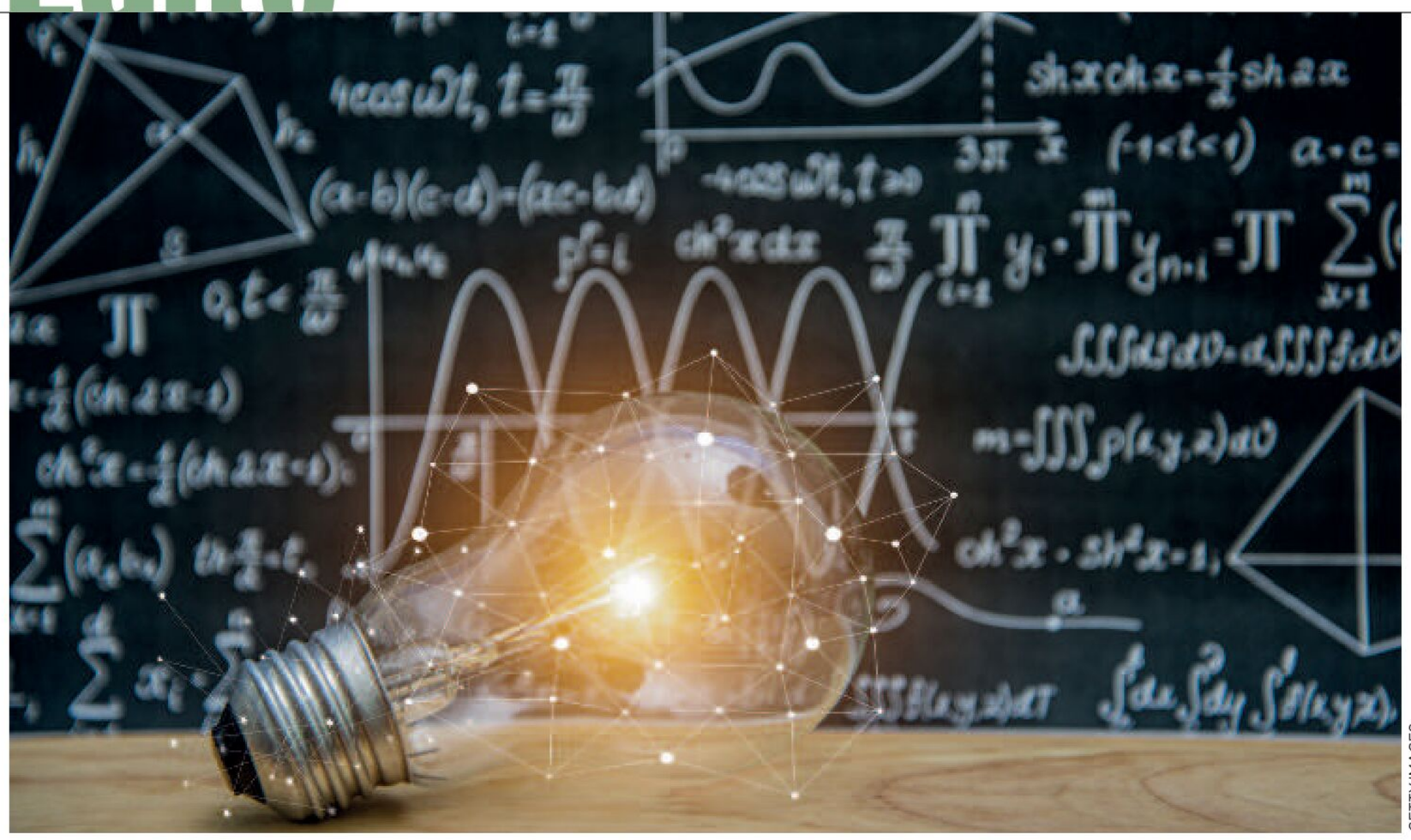
Les abonnements et réabonnements doivent être adressés à Sciences et Avenir, service abonnement
45 avenue du Général Leclerc 60643, Chantilly, Cedex.
Tél. : 03.28.38.47.69.
Tarif des abonnements : France,
1 an simple (12 numéros) : 35 €.
1 an complet (12 numéros + 4 hors-série) : 48 €.
Tarifs pour les pays étrangers sur demande.
Multimédia : Sciences et Avenir, 41 bis avenue Bosquet, 75007 Paris. Tél : 01.55.35.56.00.
Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec Sciences et Avenir, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement.
Copyright Sciences et Avenir.
Commission paritaire n° 0620K79712.
Distribué par MLP.

PEFC 10-31-1557
Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
pefc-france.org

Origine du papier : Allemagne
Taux de fibres recyclées : 0%
Eutrophisation : PTot = 0,018 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France Impression, certifié PEFC

ACPM DIFFUSION

Édito



GETTY IMAGES

Tout le monde peut se tromper

« Ce n'est pas en perfectionnant la bougie qu'on a inventé l'ampoule ! » On connaît l'adage, parfois prêté à Niels Bohr, l'un des pères de la théorie quantique. La phrase à elle seule peut résumer cette épopée de la physique que nous avons choisi de raconter ici. Un long fleuve tumultueux dont la source jaillit en Grèce il y a 2 500 ans, à l'ombre des mythes, nous rappelle Carlo Rovelli. *« Les Grecs ont changé la façon de poser les questions »*, relève le physicien italien. Les premiers démocrates de l'histoire ont cultivé l'art du dialogue et de l'argumentation raisonnée. Ainsi Aristote ne craignait-il pas de contredire son maître Platon, quand bien même il le révérait.

Les progrès de la physique doivent ainsi tout autant à cette remise en question pacifique des acquis qu'à l'observation et à l'expérimentation. La méthode fera ses preuves. Né sur les rives de la mer Égée, le torrent va grossir et ne plus s'arrêter. Bien des siècles plus tard, Ernest Rutherford osera lui aussi réfuter la théorie d'un de ses anciens professeurs, Joseph John Thomson, et le monde découvrira qu'au cœur de l'atome se cache un noyau.

Dans ce numéro, vous pourrez lire que *« La phrase la plus excitante à entendre en sciences, celle qui annonce de nouvelles découvertes, ce n'est pas "Eurêka ! mais plutôt "Tiens, c'est marrant…" »*. Tirade lumineuse de l'écrivain de science-fiction Isaac Asimov. Elle nous invite à ouvrir l'œil, à sortir du cadre, à faire fi des dogmes. Galilée ne fit pas autrement lorsqu'il tourna sa lunette vers la voûte céleste plutôt que vers l'horizon.

De l'audace ! Quitte à devoir naviguer à vue entre obscurantisme et lumière – à ce sujet, lire et relire l'admirable *Vie de Galilée* de Bertolt Brecht. Quitte à commettre des erreurs ; l'histoire de la physique en est remplie. Du fluide boréal de Pierre-Simon de Laplace au calorique de Lavoisier, de Huygens qui estimait la distance des étoiles en comparant leur éclat à celui du Soleil à Einstein refusant de se rendre à l'évidence… quantique. *« Einstein n'a jamais eu peur de se tromper… ni de se corriger »*, souligne Carlo Rovelli. Deux qualités plus que certainement partagées par Alain Aspect, « notre » lauréat du prix Nobel de physique 2022. Celui qui, il y a quarante ans, lancé à la poursuite des photons sur les chemins arides de la mécanique quantique, tranchait grâce à une expérience audacieuse la controverse historique opposant deux géants : Bohr et Einstein. Oui, nous savons désormais que deux particules, même éloignées, peuvent rester liées. C'est peut-être un détail pour vous, et pourtant cela promet beaucoup…

Et demain, justement ? Nous avons invité cinq scientifiques à effectuer un – petit – bond en avant. Une théorie de la gravitation quantique pourrait-elle résoudre enfin les problèmes de la cosmologie ? Peut-être… À moins qu'une fois encore, une nouveauté conceptuelle vienne balayer tout l'édifice. Faut-il en trembler ? Mieux qu'un long discours, la réponse du physicien Jean-Marc Lévy-Leblond : *« Si une nouvelle théorie émergeait, les physiciens ne pleureraient ni la mécanique quantique ni la relativité générale. Ils seraient fous de joie ! »*

VINCENT REA

CARLO ROVELLI

Physicien et historien des sciences

« Pour Galilée, la physique d'Aristote est bonne, mais pas assez »

Qu'ont en commun Anaximandre, premier scientifique de l'histoire, Galilée et Einstein ? Tous ont contesté leurs maîtres sans pour autant les vouer aux gémonies, raconte ce spécialiste de la gravité quantique, qui prolonge, enthousiaste, leur découverte du monde.

Est-il juste de dire que l'histoire de la physique commence avec les Grecs ?

Avec un bémol ! Dans une acception large, on peut déjà appeler « physique » les campagnes systématiques d'observation du ciel par les Assyriens et les Babyloniens. Mais elles sont toujours liées à des croyances. On le voit bien dans les tablettes : on cherche une connexion directe entre ce qui se passe dans le ciel et les épidémies, la guerre, etc. Ce lien va se perdre chez les Grecs à partir du VII^e^ siècle avant notre ère, à Milet, l'une des cités les plus prospères de l'époque. Là, des penseurs comme Thalès, Anaximandre ou Anaximène commencent à étudier le monde naturel en termes naturalistes. De ce point de vue, on peut considérer Anaximandre comme marquant le début de la science. Par exemple, à la question : « d'où vient la pluie ? », il fait l'hypothèse – juste – que l'eau qui s'évapore de la mer et des lacs rejoint le ciel avant de retomber… Jusque-là, la pluie était envoyée par un dieu.

Comment expliquer cette rupture majeure ?

Bien sûr, il y a beaucoup d'observations : si l'on met de l'eau dans un verre et qu'elle disparaît, où va-t-elle ? Mais je dirais que cette rupture est méthodologique, épistémologique : on ne pose plus les questions de la même façon. Milet est la ville grecque la plus connectée avec l'Égypte et la Mésopotamie, mais sa structure politique et sociale est différente : il n'y a plus là un grand palais central avec une caste sacerdotale. Des rois sont renversés, des régimes démocratiques instaurés… C'est aussi à cette époque qu'est fondée la Ligue ionienne, une alliance de douze cités d'Asie Mineure, dans laquelle les décisions sont prises par un débat collectif… L'idée germe qu'on peut remettre en discussion des choses apprises des maîtres sans pour autant tout abandonner, et que l'on peut trouver des réponses grâce à un débat rationnel. Dans les autres civilisations, en Chine, par exemple, où le pouvoir impérial s'est très tôt doté d'un institut d'astronomie, il n'y a jamais eu cette féconde remise en question des acquis qui a fait démarrer la science occidentale.

Est-ce tout ce que nous a légué l'Antiquité ?

La grande avancée suivante, c'est l'utilisation des mathématiques. L'idée n'est pas évidente : pourquoi permettent-elles de mieux comprendre le monde ? Personne n'y a pensé en Chine ou en Amérique précolombienne ! Elle vient de Pythagore et se développe dans l'école de Platon au IV^e^ siècle avant notre ère, engageant à décrire le mouvement des astres en termes mathématiques. Ce qui donnera l'exceptionnelle astronomie alexandrine. Aujourd'hui encore, sans rien savoir de la course des planètes, on peut ouvrir le livre de l'astronome Ptolémée (100 – 168) et s'en servir pour produire un calcul qui prédira exactement où se trouve Vénus dans le ciel à cet instant.

Mais il faudra attendre des siècles pour se rendre compte, avec Galilée, que grâce aux mathématiques, cette physique que les Anciens pratiquaient pour comprendre le ciel peut être aussi utilisée pour la Terre. Et que la physique d'Aristote est remarquable, mais pas assez, et uniquement qualitative : avec Aristote

> **« D'où vient la pluie ? Au VII^e^ siècle av. J.-C., le Grec Anaximandre répond : l'eau qui s'évapore rejoint le ciel avant de retomber… »**

CARLO ROVELLI

Physicien et historien des sciences, il est l'un des fondateurs de la théorie de la gravité quantique à boucles. Il est directeur de recherche au CNRS et professeur émérite à l'université d'Aix-Marseille. Il travaille également au Canada où il enseigne la philosophie des sciences.

Parmi ses ouvrages:
Et si le temps n'existait pas? Dunod, 2021

L'Ordre du temps, Flammarion, 2019

Sept brèves leçons de physique, Odile Jacob, 2015

Anaximandre de Milet ou la naissance de la pensée scientifique, Dunod, 2009

– n'oublions pas Aristote, c'est lui qui a inventé l'observation scientifique systématique ! –, les choses tombent « plus vite », ou « plus lentement ». Galilée, lui, va trouver une équation qui décrit les choses qui tombent.

Il incarne une rupture méthodologique majeure…

Plusieurs ! Il est aussi le premier à se dire : « Je vais construire dans ma cuisine une situation très particulière qui va me permettre de demander à la nature comment les choses tombent. Je vais mettre en place un dispositif pour qu'elles tombent plus lentement, de sorte que je puisse mesurer leur chute. » Il invente donc l'expérience scientifique.

L'autre rupture, c'est l'utilisation d'instruments. Galilée s'est targué d'avoir inventé la lunette, mais ce n'est pas vrai… n'oublions pas qu'il est italien *(sourire)* ! Mais c'est un formidable artisan, et il l'améliore énormément. Surtout, il a l'idée extraordinaire de s'en servir pour regarder la Lune, Jupiter, le Soleil, etc. Il se rend compte qu'un instrument permet de faire de la science.

C'est pourtant Newton qui a hérité du titre d'inventeur de la physique moderne…

Marchant dans les pas de Galilée et Kepler, Newton se rend compte qu'on peut écrire des équations qui ne décrivent pas seulement comment les choses tombent ou comment les astres tournent, mais… tout. On écrit trois équations, et l'on s'aperçoit qu'elles contiennent une immensité de phénomènes, qu'on peut les utiliser pour calculer où va tomber un tir d'artillerie, construire des ponts…

… alors qu'il était aussi alchimiste !

Oui, il s'est également beaucoup occupé d'alchimie. Pourquoi s'est-il penché sur ce que l'on considère aujourd'hui comme la chose la moins scienti- ◆◆◆

◆◆◆ fique du monde, une grande mélasse d'idées à la fois spirituelles et matérielles ? L'observation cruciale, selon moi, c'est ce que cet homme qui a publié sur tout, l'optique, les couleurs, la gravité, qui était le président de la Royal Society, n'a rien publié sur l'alchimie. Pourquoi ? Parce qu'il n'est pas arrivé à faire une science à partir de tout ce qu'elle avait d'intéressant, comme les nombreuses recettes de fabrication. J'ai regardé ses textes. Il cherchait de toute évidence à donner une description rationnelle des substances élémentaires. Le projet n'était pas stupide, puisqu'il a été réalisé quelques décennies plus tard par Lavoisier… Mais lui n'y est pas parvenu. En ne publiant pas, en étant conscient de ses limites, Newton se comporte donc en parfait scientifique newtonien.

On peut désormais imaginer, décrire et prédire des choses… qu'on ne voit pas.

C'est la puissance immense de la physique théorique, et je dirais son aspect étonnant. Et ça va continuer : Newton a décrit un monde peuplé uniquement de particules qui s'attirent et se repoussent. Or il se passe quelque chose de nouveau dans le laboratoire de l'Anglais Faraday, quelques décennies plus tard : avec quelques morceaux de fer, un aimant, des choses très simples, il comprend qu'il existe autre chose dans l'Univers : les champs électrique et magnétique, des entités diffuses, qui ont une dynamique, qui peuvent osciller… Encore aujourd'hui, les champs sont l'objet fondamental avec lequel fonctionne la physique théorique, que ce soit la relativité générale d'Einstein – selon laquelle l'espace-temps est un champ physique – ou la physique des particules (qui décrit le monde à très petite échelle, celle des constituants des atomes et des noyaux atomiques).

> **« Avec quelques morceaux de fer, un aimant, Faraday comprend qu'il existe autre chose que des particules : les champs électrique et magnétique**

Faraday se rend donc compte qu'il existe des champs, mais il est très, très mauvais en maths. C'est le mathématicien James Clerk Maxwell qui mettra tout ça en équations. De cela, il déduit qu'il existe les ondes électromagnétiques. Quinze ans plus tard, l'Allemand Hertz va produire puis détecter les ondes radio…

Entre parenthèses, il y a quelque chose de magnifique dans ce chapitre de l'histoire des sciences : la manière dont Faraday et Maxwell sont parvenus à se comprendre. Tout les sépare : le premier vient du peuple, il est pauvre, peu instruit. Un génie absolu, et anglais. Le second, un aristocrate écossais, riche, l'un des plus grands mathématiciens de tous les temps… Il faut lire leurs lettres ! Lorsque Faraday écrit : « La force électrique est conservée », Maxwell lui répond : « Ça ne veut rien dire, il y a force et ensuite il n'y a plus force ». Faraday poursuit ses explications et Maxwell reprend : « Ah, vous voulez dire que… » C'est une lente composition à partir de langages différents. Et ce qui en sort, c'est l'électromagnétisme, la théorie à la base de toute la technologie moderne : communications, moteurs électriques, électronique…

La rupture, ce n'est donc pas la relativité générale, mais l'idée de champ ?

Ce n'est pas pour diminuer Einstein… Mais il a construit la relativité générale sur la base de cette idée de champ. Après avoir découvert la relativité restreinte en 1905, il constate que pour que la gravité et la relativité soient cohérentes, il faut un champ gravitationnel. Pendant dix ans, il cherche comme un fou les équations de ce champ… et il finit par réussir, en 1915. Et dans ces équations se trouvent les trous noirs, les ondes gravitationnelles, l'expansion de l'Univers…, prédictions qui ont toutes reçu, depuis, une confirmation expérimentale. Encore une preuve de l'étonnante force prédictive de la physique théorique !

Quel est aujourd'hui le défi majeur de la physique ?

Le plus intéressant, selon moi, est de concilier la mécanique quantique – l'autre grande rupture après Einstein – et la relativité générale, afin de décrire les phénomènes quantiques de l'espace-temps. C'est la gravité quantique : nous savons que le monde est quantique, nous savons que l'espace est une entité dynamique. Mettons ces notions ensemble et complétons le cadre. On parle aussi souvent de théorie unifiée ou de théorie du tout, mais il ne me semble vraiment pas évident que l'on puisse écrire aujourd'hui une équation du tout… Des tentatives existent, par exemple la théorie des cordes, mais elles ont déçu les espoirs initiaux. En revanche, la gravité quantique, c'est du concret. On est raisonnablement sûr qu'il existe dans l'Univers des situations dans lesquelles le champ gravitationnel se comporte de façon quantique, notamment au centre des trous noirs ou dans l'Univers primordial. J'ai travaillé une grande partie de ma vie sur la gravité quantique à boucles, et je pense qu'elle est aujourd'hui la meilleure hypothèse.

Pouvez-vous nous l'expliquer en deux mots ?

Le résultat central de cette théorie est que l'espace dans lequel nous sommes n'est pas continu. Si j'enferme un morceau d'espace entre mes mains, je peux imaginer le diviser en deux, puis encore en deux, etc. La théorie prévoit que je ne peux pas poursuivre à l'infini : il existe des grains élémentaires d'espace, qui ne semblent former quelque chose de continu que parce qu'ils sont extrêmement petits, un peu comme un t-shirt qui, de loin, semble lisse mais dont on distingue chaque maille en s'approchant. Ces grains d'espace se

Dans la poésie de Lucrèce, il y a des passages d'une splendeur absolue sur la manière dont les atomes ont composé les choses

comportent de façon quantique, comme les photons ou les électrons. Mais ils ne sont pas immergés dans l'espace… ils sont eux-mêmes l'espace. Ils « savent » qui est à côté de qui, comme s'il y avait un petit lien entre les deux. Et l'on peut sauter de l'un à l'autre et faire une boucle en revenant au départ, de lien en lien. Mais nous n'avons pas encore de vérification expérimentale. Et en physique, il ne suffit pas de construire une belle théorie, il faut la tester ! Alors on continue à travailler.

Y a-t-il eu de grandes erreurs en physique ?

Je suis un fan des erreurs d'Einstein ! Il y en a plein ! Dans ses articles, on trouve l'idée fausse qu'il n'y a pas d'ondes gravitationnelles. Il a fini par se corriger – il a changé d'avis trois fois. Dans le grand article où il invente la cosmologie moderne en appliquant la relativité à l'Univers, il ne se rend pas compte que sa solution n'est pas stable. Un étudiant qui commettrait ce genre d'erreur n'aurait pas son examen… Einstein est quelqu'un qui n'a aucune peur de se tromper et aucune peur de se corriger. Ce qui n'enlève rien à son génie… au contraire !

Dans un autre registre, Henri Poincaré, un mathématicien fantastique, avait en main tous les ingrédients de la relativité restreinte avant 1905. Mais il n'a pas compris ce qu'Einstein – un gamin de 23 ans, pas très doué en maths ! – verra exactement. Pourquoi ? Sa façon de voir le monde l'a peut-être empêché de comprendre que le temps est différent pour des horloges sur des trajectoires différentes.

Il y a une grande différence entre les modes de travail d'un physicien et un mathématicien ?

Tout à fait. Un physicien n'a aucun intérêt pour la rigueur mathématique. Si une chose se passe « presque certainement », c'est pour lui « certainement ». Le mathématicien a besoin de preuves, le physicien d'absence de contre-exemple. Par ailleurs, le physicien a souvent une façon très visuelle et métaphorique de penser. Lorsqu'Einstein se demande ce qui se passe si l'on court avec un rayon de lumière, il imagine un cheval-rayon de lumière… Déjà, Anaximandre avait compris que la Terre est un caillou qui flotte dans l'Univers comme s'il était parvenu à la contempler de très loin. D'ailleurs, c'est aussi le premier à avoir fait des cartes géographiques, en regardant la Terre comme un oiseau. Plus tard, en pensant aux champs électromagnétiques, Faraday verra des lignes qui bougent dans l'espace, un champ de blé agité par le vent. Ce qui intéresse le mathématicien, ce n'est pas l'image approximative, c'est que les détails soient corrects : il lui faut une démonstration. C'est un dialogue très enrichissant entre deux pensées différentes.

Existe-t-il des liens entre les arts et la physique ?

Il est difficile de trouver une influence directe de la littérature et de la poésie sur la physique. Mais il y a un maillon entre les deux : la philosophie. Toutes les grandes ruptures se sont appuyées sur des réflexions philosophiques. À l'opposé, on ne peut pas imaginer le poète John Milton ou l'écrivain Robert Musil sans la physique de leur temps. Dans les années 1920, le fait que le même système peut s'interpréter selon des points de vue différents, qu'on ne peut pas mesurer une chose sans l'influencer, ce sont des idées qu'on retrouve dans le théâtre de Pirandello, dans la mécanique quantique de Heisenberg, dans le cubisme de Picasso…

Vous-même, avez-vous une œuvre fétiche ?

J'aime tout particulièrement Lucrèce, qui a une façon merveilleuse de faire de la poésie en puisant dans les descriptions scientifiques du monde. Il reprend l'atomisme de Démocrite, qu'il connaît par Épicure, et il écrit un texte qui est le seul véritable texte de science de la période romaine, chanté avec des vers lumineux. Il y a des passages sur la manière dont les atomes ont composé les choses d'une splendeur absolue. C'est pour moi le poète qui a le mieux su saisir le rapport avec la nature, les émotions, la beauté propres à la science. Pas la science froide, mais la science vivante, celle de quelqu'un qui aime la nature et veut la comprendre…

PROPOS RECUEILLIS PAR FLORENCE LEROY ET VINCENT REA

PHOTOS : COLE BURSTON/AFP POUR SCIENCES ET AVENIR

Ils ont cherché à expliquer le monde

De Thalès à Stephen Hawking, un voyage dans le temps en compagnie de ces grandes figures dont les travaux, et parfois le génie, ont contribué à façonner la physique telle que nous la connaissons aujourd'hui.

Textes : Vincent Rea Dessins : Roland Garrigue

VII^e siècle av. J.-C.

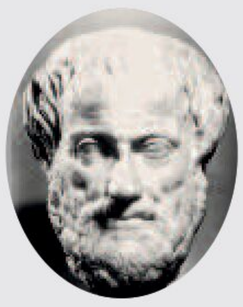
Les premiers physiologues

À Milet, en Asie Mineure, trois « physiologues » – **Thalès, Anaximandre et Anaximène** – formulent des théories expliquant les phénomènes naturels hors de toute intervention divine. Pour **Thalès**, la cause matérielle première est l'eau. Pour **Anaximandre,** il s'agit de quelque chose d'indéfini qu'il nomme l'illimité (*apeiron*). **Anaximène** considère que la substance originelle est l'air.

IV^e siècle av. J.-C.

Aristote

Disciple de Platon et précepteur d'Alexandre le Grand, il construit une somme de connaissances basées sur l'observation et l'expérimentation. Il développe une explication des phénomènes naturels par quatre causes (matérielle, formelle, motrice et finale) et quatre constituants de la matière, les fameux quatre éléments : la terre et l'eau, qui ont tendance à tomber ; l'air et le feu, qui montent. Il est aussi le père de la logique et de la métaphysique. Il se serait noyé à 62 ans en cherchant à déterminer la vitesse d'un courant marin.



BRIDGEMAN

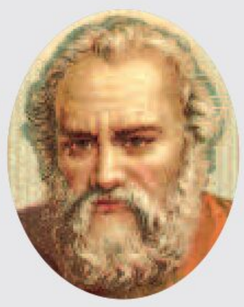
Aristote

384-322 av. J.-C.

III^e siècle av. J.-C.

Archimède

Physicien et ingénieur, il participe à la défense de sa ville, Syracuse, contre les Romains en la faisant bénéficier de ses inventions (machines de guerre en tout genre). La légende dit qu'il aurait incendié la flotte romaine en concentrant les rayons du Soleil sur les voiles au moyen de miroirs paraboliques. On lui attribue l'invention de la vis sans fin, de la roue dentée, de diverses poulies et de la théorie du levier. Et, bien sûr, les fondements de l'hydrostatique avec… la poussée d'Archimède.



CHRISTOPHEL

Archimède

287-212 av. J.-C.

Ératosthène

Astronome, philosophe, mathématicien, géographe et directeur de la bibliothèque d'Alexandrie. Il parvient à calculer, à quelques centaines de kilomètres près, la circonférence de la Terre.

II^e siècle

Ptolémée

Il est l'auteur de l'*Almageste*, ouvrage rassemblant neuf siècles d'observation du ciel : des tables de positions très précises et un catalogue d'un millier d'étoiles.

I^er siècle

Héron d'Alexandrie

Ingénieur et mathématicien. On lui attribue de nombreux traités consacrés à la mécanique ainsi que l'invention de plusieurs machines dont l'éolipyle, considéré comme l'ancêtre de la machine à vapeur.

1440

Nicolas de Cues

Publication de *La Docte Ignorance.* Il est l'un des premiers théologiens à considérer que le monde est sans limite finie, d'une grandeur incommensurable. Et que la Terre ne peut être en son centre, ni fixe.

AKG IMAGES

Tycho Brahé

1546-1601

Tycho Brahé

Le plus grand observateur de son époque… sans lunette ni télescope. Parmi ses innombrables observations à l'œil nu, il découvre, en 1572, grâce à ses sextants et quadrants, une « étoile nouvelle » – en réalité une supernova – et doit admettre que le ciel n'est pas immuable, comme on le croyait depuis Aristote. Kepler fut son assistant.

1269

Pierre de Maricourt

Ce savant français, spécialiste de métallurgie, publie le premier traité sur les propriétés des aimants, hors de toute considération ésotérique.

OPALE PHOTO

Copernic

1473-1543

Copernic

Médecin de formation, chanoine (il entre dans les ordres en 1503) et astronome. Son ouvrage *Des révolutions des orbes célestes*, publié à la veille de sa mort, présente le système héliocentrique : ce n'est pas la Terre mais le Soleil qui occupe le centre de l'Univers. Les planètes tournent autour de lui et sur elles-mêmes. Une révolution !

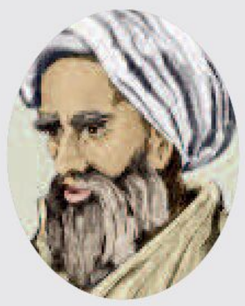
17 février 1600

Giordano Bruno est brûlé vif à Rome pour avoir, entre autres, défendu l'hypothèse d'un Univers infini, donc d'une infinité potentielle de systèmes solaires… et de planètes comme la nôtre.

XIe siècle

Alhazen

L'un des plus grands scientifiques de la période médiévale. Son traité d'optique va influencer les savants pendant plusieurs siècles. Il invente la chambre noire et étudie la réflexion et la réfraction de la lumière, et comprend que les rayons lumineux se propagent de l'objet vers l'œil. Il tente d'expliquer divers phénomènes météorologiques comme les mirages, les halos, les arcs-en-ciel…



AKG IMAGES

Alhazen

965-1040

Les alchimistes, aux sources de la chimie

Ils voulaient changer le plomb en or et guérir toutes les maladies. Quelle folie ! Pourtant, les historiens voient désormais les alchimistes sous un autre jour. *« Ce n'étaient pas des mystiques illuminés, encore moins des sorciers »,* assure Didier Kahn, chercheur à Sorbonne Université. Leurs objectifs résultaient des conceptions de leur temps : même au XVIIIe siècle, l'idée de transmutation a toujours ses adeptes. *« Ils exploraient la matière »*, ajoute le chercheur. Ils ont distillé, expérimenté avec des acides et des solvants, combiné et décomposé des substances… On attribue à l'Italien Paul de Tarente (alias Pseudo-Geber) la découverte au XIIIe siècle des acides nitrique et sulfurique. Il montre que l'eau régale (mélange d'acides chlorhydrique et nitrique) dissout l'or. Selon Didier Kahn, *« le mot "chimie" apparaît à la fin du XVe siècle, le terme "alchimie" étant devenu péjoratif en raison des tromperies de faussaires, notamment des faux monnayeurs. Mais la transition est confuse. Ainsi, l'Irlandais Robert Boyle (1627-1691), longtemps considéré comme le premier chimiste, a passé sa vie à chercher à transmuter le plomb en or… »*

PIERRE VANDEGINSTE

1608

La lunette, par le Hollandais Hans Lippershey.

Galileo Galilei
Physicien et astronome, il est le père de la mécanique. La légende veut que dans sa jeunesse, il ait jeté différents objets du haut de la tour de Pise pour étudier leur chute. En 1604, il énonce la loi sur la chute des corps. Et grâce à la lunette, qu'il perfectionne, il découvre le relief de la Lune, les satellites de Jupiter, les phases de Vénus… Fervent partisan du système copernicien, il doit abjurer ses idées en 1633.

AURIMAGES

Galilée
1564-1642

René Descartes
Mathématicien, physicien et philosophe, il fonde ni plus ni moins une science nouvelle, basée sur le doute méthodique et la philosophie mécaniste selon laquelle la réalité s'explique par un système de causes débouchant sur un certain nombre de fonctionnements. Les phénomènes n'ont aucun but, ils sont la résultante d'un enchaînement de liens de cause à effet. Dieu existe… mais son champ d'intervention va bientôt rétrécir.

BRIDGEMAN

René Descartes
1596-1650

1643

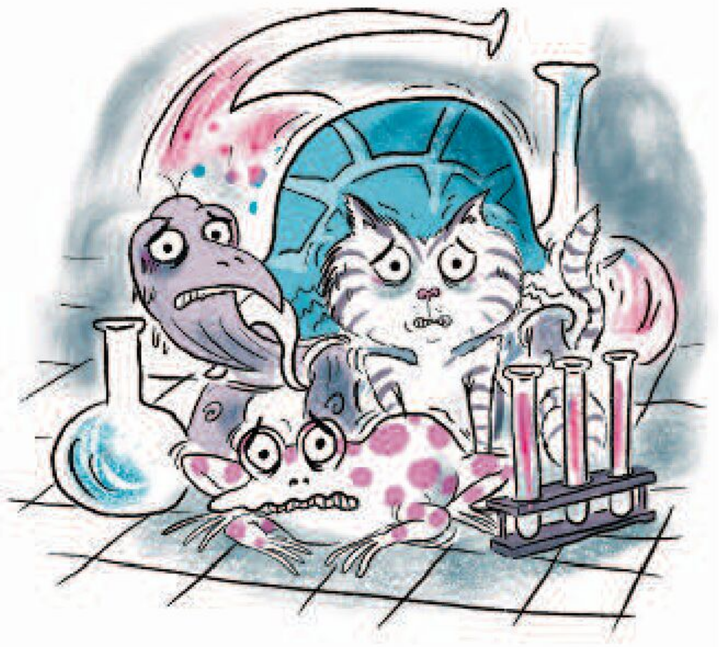
Le baromètre à mercure, par Evangelista Torricelli, disciple de Galilée.

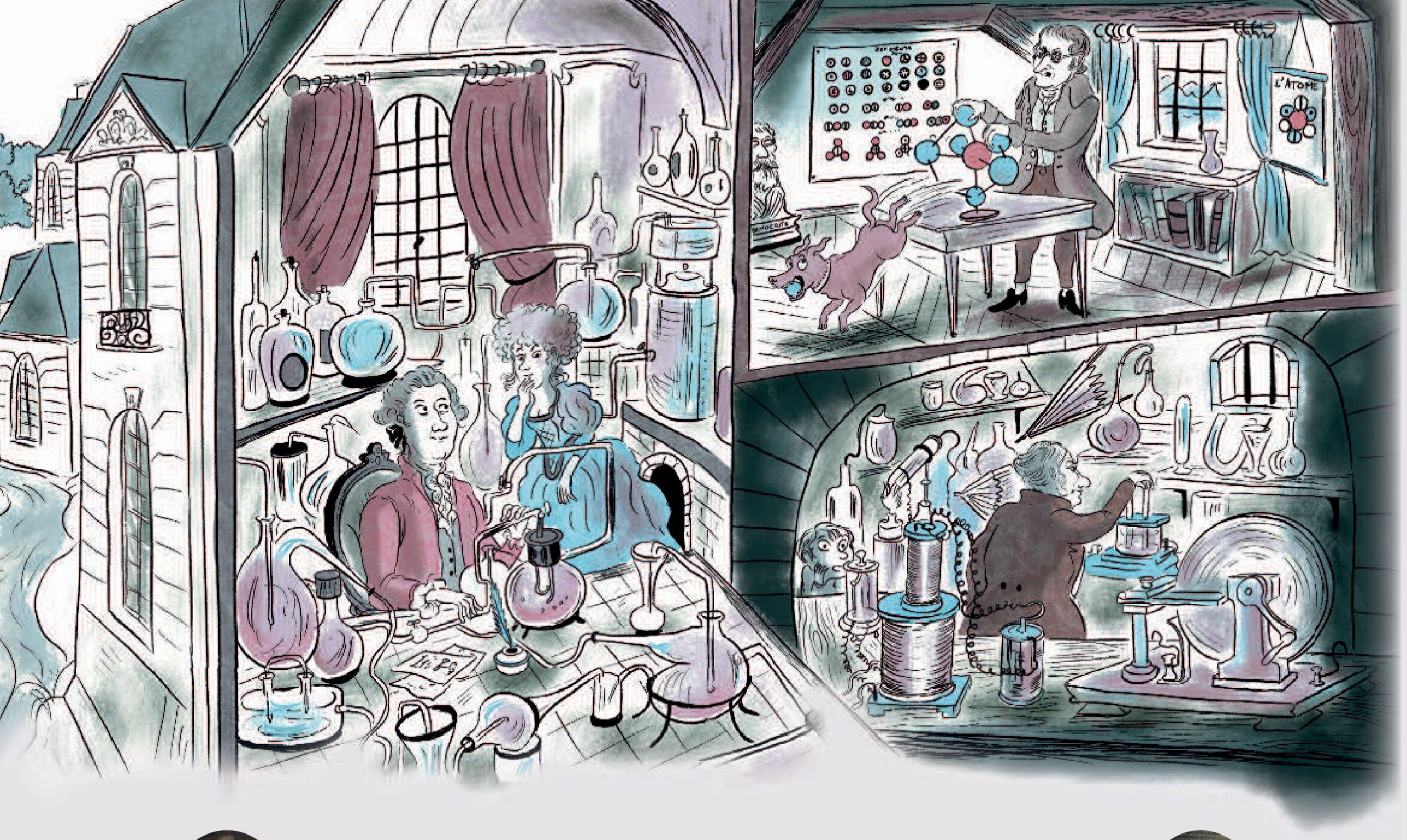
1654

Le thermomètre à alcool gradué, par Ferdinand II de Médicis.

Les physiciens et leurs « amies » les bêtes

Pour rendre intelligibles des concepts complexes, les scientifiques ont parfois eu recours à la parabole animalière. Ainsi avec le paradoxe d'Achille et de la tortue du philosophe grec Zénon d'Élée au Ve siècle avant J.-C. *(lire p. 20)*. Ou avec le chat de Schrödinger qui, du point de vue de la physique quantique, peut être à la fois vivant et mort *(lire p. 69)*. Mais à côté de ces jeux de l'esprit, la physique a aussi convoqué des bêtes en chair et en os. En 1654, Otto von Guericke mobilisa deux attelages de quinze chevaux au cours d'une démonstration sur la force de la pression atmosphérique : il fit le vide dans une sphère composée de deux hémisphères creux en cuivre plaqués l'un contre l'autre, et les fit tirer dans des directions opposées par les chevaux, qui échouèrent à les séparer… À la fin du XVIIIe siècle, Luigi Galvani sacrifia à ses travaux sur l'influence de l'électricité sur les nerfs quantité de grenouilles. Ayant observé que leurs muscles se contractaient lorsqu'ils étaient en contact avec deux métaux différents, il en conclut à l'existence d'une électricité animale… réfutée par Alessandro Volta, qui exploita l'alliance du cuivre et du zinc pour mettre au point la pile électrique. Au début du XXe siècle, ardent partisan de l'usage du courant continu, Thomas Edison fit mourir un éléphant pour prouver la dangerosité du courant alternatif. L'animal de cirque avait été condamné à mort pour avoir tué un dresseur… Quant au physicien George Gamow, il soumit à *Nature*, dans les années 1950, un article qui établissait un lien entre le sens de mastication des vaches, présenté comme distinct dans chaque hémisphère terrestre, et la force de Coriolis… Un canular qui n'abusa pas la prestigieuse revue. MARIE-AMÉLIE CARPIO





BRIDGEMAN

Isaac Newton

1643-1727

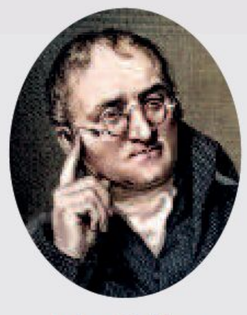
Isaac Newton

Dans ses *Principes*, publiés en 1687, figure la loi de gravitation universelle. Celle-ci s'exprime entre deux astres par une force (proportionnelle à leur masse et à l'inverse du carré de la distance qui les sépare) qui agit sans support matériel. Newton contribue également aux progrès de l'optique, à une époque où le débat sur la nature de la lumière n'est pas encore tranché *(lire aussi p.50),* et de l'analyse mathématique en « inventant », avec Leibniz, le calcul infinitésimal. La mécanique newtonienne – ou classique – décrit les mouvements des corps à des vitesses faibles. Elle fixe pour deux siècles le cadre de la physique.

1803

John Dalton

Chimiste et physicien, il élabore la première théorie atomique scientifique : la matière est composée d'atomes indivisibles et indestructibles qui se combinent pour former des composés. Il introduit également le concept de masse atomique. Il est aussi le premier chercheur à décrire et expliquer le daltonisme, dont il souffrait lui-même et qui lui doit, en France du moins, son nom.



ADOC PHOTOS

John Dalton

1766-1844

1769

La machine à vapeur, perfectionnée par l'Écossais James Watt.

1800

La pile électrique, par Alessandro Volta.

1824

Sadi Carnot pose les bases de la thermodynamique dans *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance.*

1836

La cage de Faraday, utilisée pour bloquer les champs électromagnétiques.

1745

La bouteille de Leyde, ancêtre du condensateur, par le Prussien Ewald von Kleist et le Hollandais Pieter van Musschenbroek.

Antoine Lavoisier

Philosophe et chimiste, il bouscule la théorie des quatre éléments en démontrant notamment que l'eau est un corps composé de deux gaz : oxygène et hydrogène. Il mesure et pèse, et déduit de ses expériences le principe selon lequel, au cours d'une réaction chimique en système fermé, la masse des produits formés est égale à la masse des réactifs : *« rien ne se perd, rien ne se crée »*. Il propose également une nouvelle théorie de la combustion : la chaleur est un *« fluide subtil »*, le calorique, qui s'écoule des corps chauds vers les corps froids. Malgré tous ces services rendus à la science et à la nation, il sera guillotiné, sous le prétexte avancé par le tribunal révolutionnaire que *« la République n'a pas besoin de savants »*.

ADOC PHOTOS

Antoine Lavoisier

1743-1794

Michael Faraday

Piètre mathématicien mais expérimentateur génial, il découvre, en 1821, le principe du moteur électrique : la circulation d'un courant électrique au voisinage d'un champ magnétique provoque le mouvement mécanique. Dix ans plus tard, il prouve scientifiquement l'induction électromagnétique, dont le principe équipera nos plaques de cuisson, transformateurs et chargeurs de téléphones. Enfin, il réalise une série d'expériences montrant qu'une transformation chimique peut être provoquée par électrolyse, ce qui aboutira à l'établissement des lois… de Faraday.

BRIDGEMAN

Michael Faraday

1791-1867

1851

Le pendule de Foucault, conçu pour mettre en évidence la rotation de la Terre.

1856

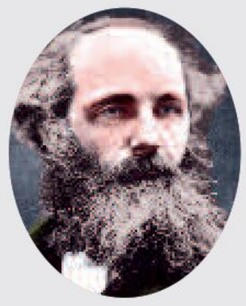
Eunice Foote identifie l'effet de serre en étudiant l'effet du rayonnement solaire et de la concentration de certains gaz sur le réchauffement de l'air. Elle est par ailleurs une militante active des droits des femmes.

LAMY/PHOTO12

Eunice Foote

1819-1888

James Maxwell Il parvient à synthétiser en une théorie et quatre équations l'ensemble des découvertes récentes sur les champs, la lumière et l'électromagnétisme. Il démontre que la lumière est un phénomène électromagnétique, et que les champs électrique et magnétique se propagent dans l'espace sous la forme d'une onde et à la vitesse de la lumière. Il propose également une théorie de la trichromie, décrivant la méthode de synthèse additive permettant de reconstituer une couleur grâce à trois fondamentales (rouge, vert, bleu), et aurait réalisé, en 1861, la première photo couleur. En 1872, il formalisera mathématiquement la théorie cinétique des gaz avec Ludwig Boltzmann (1844-1906), père de la physique statistique et fervent défenseur de l'existence des atomes.



BRIDGEMAN

James Maxwell

1831-1879

Allemagne : l'empire des sciences

Röntgen, Heisenberg, Planck, Einstein, ou encore Hertz… De 1901 à 1932, un tiers des lauréats du prix Nobel de physique sont allemands, et la liste des chercheurs illustres encore bienplus longue. Comment expliquer une telle productivité ? Lorsqu'en 1870 le chancelier Bismarck unifie partiellement le monde germanique sous la tutelle de la couronne de Prusse, l'Empire hérite d'une mosaïque de près de 300 petits royaumes, principautés et villes indépendantes, tous dotés de leur propre université, et les jeunes chercheurs passent de l'une à l'autre. Vingt ans plus tard, le soutien à la recherche scientifique – pour rattraper les deux concurrents de l'Allemagne, pionniers de la révolution industrielle, la France et surtout l'Angleterre – s'incarne dans un ministre énergique : Friedrich Althoff, surnommé le « Bismarck des universités ». Il imposera aux autorités académiques l'embauche de professeurs et de chercheurs qu'il choisit lui-même, parfois en circulant incognito à travers le pays pour repérer les meilleurs talents ! En augmentant le nombre d'étudiants, le budget de fonctionnement des universités, celui de la recherche, les effectifs du corps enseignant… l'Allemagne invente l'Université moderne. Un âge d'or qui s'éteindra avec la catastrophe nazie des années 1930 et le départ de nombreux savants.

RENÉ CUILLIERIER

1895

Wilhelm Röntgen (1845-1923) découvre « par hasard » les rayons X, radiographiant notamment la main de sa femme. Il recevra le tout premier prix Nobel de physique, en 1901.

1900

Max Planck amorce la théorie des quanta (quantités discontinues) qui tente de décrire le comportement de l'énergie à très petite échelle. Cette théorie sera développée par Einstein, Bohr ou Heisenberg pour devenir la physique quantique.

DOMAINE PUBLIC

MaxPlanck
1858-1947

1905

***Annus mirabilis* d'Einstein** qui publie cinq articles majeurs : sur les molécules, l'effet photo-électrique, le mouvement brownien, la relativité restreinte et la relation masse-énergie. Dix ans plus tard, il énonce sa théorie de la relativité générale qui englobe la gravitation de Newton et bouleverse notre conception de l'Univers : la gravitation n'est plus une force, mais la manifestation de la courbure de l'espace due à la répartition de la matière et de l'énergie qu'il contient.

PHOTO12

Albert Einstein
1879-1955

1938

La fission nucléaire
La fragmentation d'un noyau d'uranium en deux noyaux plus légers s'accompagne de l'émission de neutrons et d'un puissant dégagement d'énergie. Ce phénomène, mis en évidence en 1938 par les Allemands Otto Hahn, Fritz Strassmann et Lise Meitner, signe l'acte de naissance de l'énergie nucléaire et conduit, notamment, à la mise au point de la bombe atomique larguée sept ans plus tard sur Hiroshima et Nagasaki.

Marie Curie
Première femme à avoir reçu le prix Nobel (de physique et de chimie), elle se consacre, avec son époux Pierre, à l'étude des rayons X et découvre deux nouveaux éléments radioactifs : le polonium et le radium. Ses travaux sur la radioactivité permettront la mise au point de la radiothérapie, utilisée notamment dans le traitement des cancers… mais aussi le développement de l'arme atomique. Elle les paiera de sa vie puisqu'elle succombera à une leucémie provoquée par son exposition prolongée aux radiations.

BRIDGEMAN

Marie Curie
1859-1934

1960

Le laser, par Theodore Maiman.

1964

Arno Penzias et Robert Wilson découvrent le fond diffus cosmologique, le rayonnement électromagnétique émis 380 000 ans après le Big Bang.

1981

Le microscope à effet tunnel de Gerd Binnig et Heinrich Rohrer.

Stephen Hawking
Astrophysicien, il s'est particulièrement intéressé au problème de la singularité, un point de l'espace-temps où les équations de la physique actuelle ne s'appliquent plus, comme l'instant zéro de l'Univers ou les trous noirs. Hawking a révolutionné la compréhension de ces derniers en prédisant qu'ils pouvaient « s'évaporer » au cours du temps sous l'effet de processus quantiques.

AKG IMAGES

Stephen Hawking
1942-2018

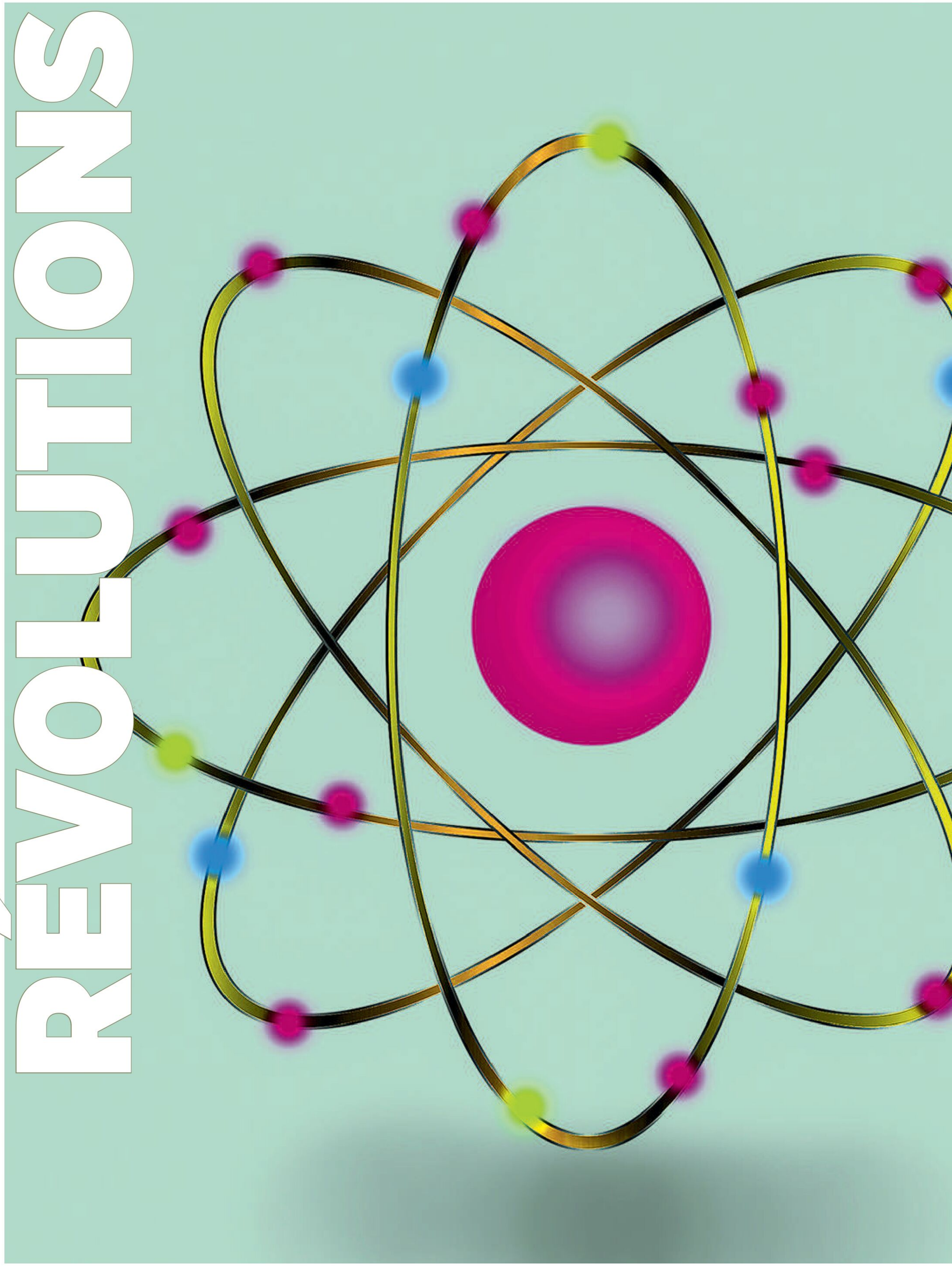
2012

Découverte du boson de Higgs.

2019

Première image d'un trou noir.

ÉVOLUTIONS



FANATIC STUDIO/SPL/SUCRÉ SALÉ

Aristote classe la nature, Galilée et Newton mettent le monde en équations, Faraday décrit d'étranges entités invisibles… Depuis que les Grecs, il y a presque trois mille ans, ont inventé la raison pour expliquer le monde, l'histoire de la physique est une suite de ruptures méthodologiques et de découvertes étourdissantes. Jusqu'à Einstein et Bohr qui font vaciller toutes les évidences !

Contre les mythes, l'éclosion de la raison

À partir du VIIe siècle avant notre ère, en Grèce, des esprits audacieux s'affranchissent des interprétations mythologiques du monde pour bâtir des théories expliquant les phénomènes naturels par des causes… naturelles. Parmi eux, Aristote, dont la pensée régnera sur l'Occident pendant près de deux millénaires.

Le mot « science » a une histoire, on ne peut l'ignorer. Le philosophe et historien des sciences Michel Blay le rappelle : *« La science des Grecs est gouvernée par l'aspiration à contempler les idées du beau et du bien à travers les apparences sensibles ; elle est ainsi inséparable d'une conception éthique du travail de connaissance. »* Ainsi, pour Aristote, la recherche physique participe de la vie contemplative, qui mobilise la partie supérieure – raisonnante – de l'âme, essentielle au bonheur. La science antique n'a donc pas grand-chose à voir avec la science d'aujourd'hui, que ce soit dans son organisation économique et politique ou ses méthodes. Quant au terme de *physis* des anciens, ajoute Michel Blay, *« il a un rapport pratiquement nul avec le mot physique d'aujourd'hui. La* physis *des Grecs est la nature, en tant qu'elle croît. Elle comporte un principe de force concret et vivant, un principe de développement qui n'est pas mathématisable. »* Pour mathématiser les phénomènes, il faudra transformer l'idée de nature. Ce qui ne sera fait qu'au XVIIe siècle…

Mais qu'ont donc apporté les Grecs qui les fait reconnaître comme les pères d'un « miracle » scientifique aussi bien que politique ou artistique ? Ils ont tout simplement opéré une révolution dans le mode de pensée. Dès le VIIe siècle av. J.-C., la compréhension des phénomènes prend un tournant résolument rationnel avec les « physiologues » d'Ionie, dans l'ouest de l'Asie mineure, notamment de la ville de Milet. *« Là, il se passe quelque chose qui n'a plus à voir avec la période antérieure, celle du mythe »*, explique Michel Blay. En racontant l'histoire du monde ou la naissance des dieux, en cherchant à expliquer la place des humains, le mythe donne la raison des choses et, de ce fait, comporte une certaine rationalité. Mais ces éléments d'explication sont figés, rendant compte des phénomènes non par des principes naturels, mais par des entités divines ou surnaturelles.

À Milet, donc, Thalès (v. 624 - v. 548 av. J.-C.), le premier, formule une théorie expliquant les phénomènes naturels à partir d'une cause matérielle première : l'eau. Il décrit l'air et le feu comme de l'eau évaporée, les objets solides étant constitués d'eau condensée. Considérant que la Terre flotte sur l'eau, il avance une explication naturaliste aux tremblements de terre : non, ils ne sont pas causés par la colère de Poséidon, mais par l'agitation des flots. Son élève présumé Anaximandre (v. 610 - v. 546 av. J.-C.) reprend l'idée d'un élément premier. Cependant, il n'imagine pas une substance spécifique, mais quelque chose d'indéfini qu'il nomme l'illimité ou l'infini (*apeiron*), à partir duquel le cosmos s'est développé. Tandis qu'Anaximène, élève supposé d'Anaximandre, considère que la substance originaire est l'air, dont toutes choses sont issues par condensation et raréfaction.

Avant les Ioniens, Babyloniens, Égyptiens et Chinois avaient observé la nature, relevant parfois depuis des siècles les positions des planètes. Mais l'usage de ces relevés astronomiques restait avant tout religieux, et confiné dans le cercle des prêtres. Ce n'est plus le cas avec les Ioniens, assure Michel Blay : *« Il ne faut pas confondre un usage religieux des savoirs et leur organisation afin de construire une science. Par leur mise en ordre déductive, qui déploie des démonstrations en partant de principes clairement établis, les Ioniens les rendent accessibles à tous. Chacun peut se les approprier et les critiquer. »* Chaque philosophe discute les thèses de son maître, si bien que la réflexion sur la nature s'inscrit dans le cadre d'échanges critiques et rationnels. ◆◆◆

D. LEFEBVRE

« EN NIANT L'EXISTENCE DU CHANGEMENT, PARMÉNIDE ET ZÉNON D'ÉLÉE PENSAIENT RUINER LE PROJET D'UNE SCIENCE DE LA NATURE, MAIS ILS ONT AU CONTRAIRE JOUÉ UN RÔLE IMPORTANT DANS SON ESSOR »

David Lefebvre,
professeur d'histoire de la philosophie ancienne à Sorbonne Université

PHOTO JOSSE/BRIDGEMAN IMAGES

Aristote représenté par le Vénitien Girolamo Mocetto, à une époque, la Renaissance, où la physique du philosophe grec n'a pas encore été remise en cause.

Déjà de la physique au Néolithique ?

Les humains du Néolithique avaient le même cerveau que nous, ils n'étaient pas plus bêtes ! », rappelle l'archéologue Jean-Paul Demoule. Pour autant, qu'en est-il de leur connaissance des procédés de transformation de la matière ? Certes, ils ont maîtrisé la poterie (600 °C) dès 18 000 avant notre ère en Chine, avant de savoir, treize siècles plus tard, fondre le cuivre et le bronze (plus de 1 000 °C) au Moyen-Orient, puis le fer (plus de 1 500 °C). *« Mais on ne connaît pas exactement les techniques utilisées, faute de traces écrites*, regrette Patrick Hairy, expert métallurgiste. *Les objets du quotidien ont pour la plupart disparu, et seules quelques pièces haut de gamme, des bijoux en particulier, sont parvenues jusqu'à nous. La qualité de ces vestiges indique que les humains d'alors avaient sans doute constaté, par exemple, les piètres propriétés mécaniques de l'or pur, et compris qu'en le mélangeant à de l'argent et du cuivre, on abaisse sa température de fusion. »* Par ailleurs, pour aviver les braises et obtenir dans les fours des niveaux de chaleur très élevés, ils utilisaient des soufflets, probablement en peau de chèvre. En avaient-ils déduit un lien entre cet apport d'air et la combustion ? Non, d'après le spécialiste. Car ils avaient probablement une fausse représentation des phénomènes. *« La mythologie devait être très présente dans la pratique de la métallurgie »*, estime Patrick Hairy. *« Toutes ces opérations s'accompagnaient de rituels*, confirme Jean-Paul Demoule. *Car dans toutes les mythologies du monde, le forgeron est un personnage très particulier, souvent doué de pouvoirs magiques et bénéficiant d'une certaine aura. »* Au Néolithique, l'évolution des techniques de métallurgie est donc expérimentale, relevant de l'essai-erreur.

LÉNA HESPEL

◆◆◆ Mais pourquoi la rationalité a-t-elle émergé à cet endroit du monde ? David Lefebvre, professeur d'histoire de la philosophie ancienne à Sorbonne Université, note que *« pendant la période dite archaïque* (750-490 av. J.-C.), *la ville de Milet et sa région étaient les plus développées, les plus prospères, les plus puissantes du monde grec ».* Ce tournant de pensée s'explique aussi par l'importance de la parole publique. *« L'art oratoire qui se développe, avec les débats dans les assemblées politiques, suppose une réflexion très fine sur la causalité »*, souligne-t-il.

Mais rapidement, certains penseurs jugent problématique la connaissance du monde extérieur délivrée par les sens. Parménide d'Élée (fin du VIe siècle - milieu du Ve siècle av. J.-C.) conteste même la réalité du changement, affirmant que l'Être est, immuable et éternel. Il est suivi par Zénon d'Élée (v. 490 - v. 430 av. J.-C.), qui formule ses fameux paradoxes sur le mouvement. Dans l'aporie d'Achille et de la tortue, le héros grec, plus véloce, ne rattrape jamais l'animal parti bien avant lui. Celui-ci continue d'avancer pendant qu'Achille comble son retard sur sa position précédente, si bien que le mouvement paraît impossible ! *« En niant l'existence du changement, les Éléates pensaient ruiner le projet d'une science de la nature*, précise David Lefebvre, *mais ils ont au contraire joué un rôle important dans son développement. »*

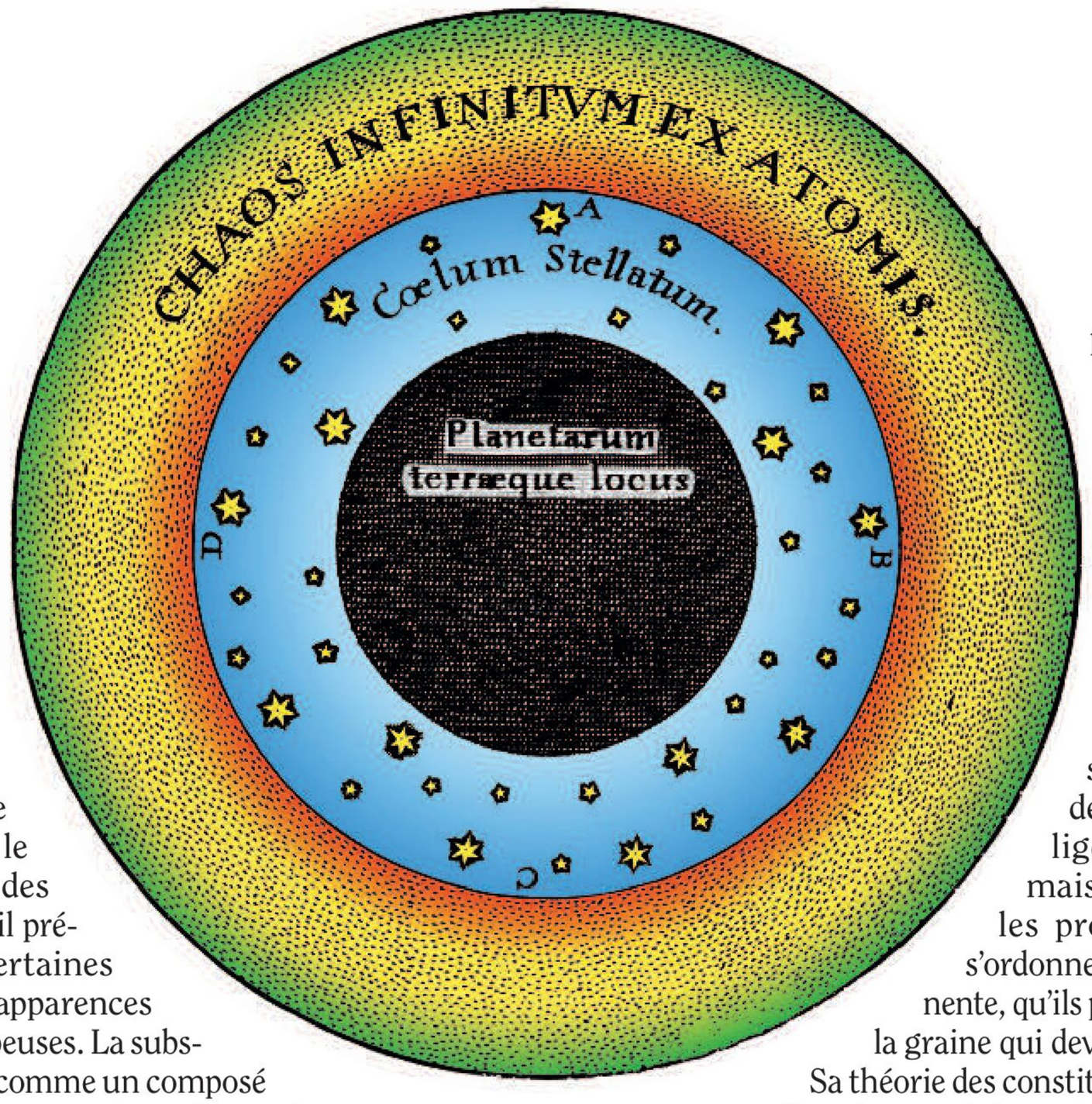
CHAQUE PHILOSOPHE DISCUTE LES THÈSES DE SON MAÎTRE, SI BIEN QUE LA RÉFLEXION SUR LA NATURE S'INSCRIT DANS LE CADRE D'ÉCHANGES CRITIQUES ET RATIONNELS

Quand Démocrite imaginait l'atome, élément insécable, et le vide…

Car les physiciens doivent riposter à cette négation du mouvement. Empédocle (v. 490 - v. 430 av. J.-C.) affirme que les quatre éléments (terre, air, eau, feu) ont toujours existé et produisent le changement par leur mélange et leur séparation sous l'action de deux forces opposées, l'Amour et le Conflit. Autre théorie physique ingénieuse, celle formulée par Anaxagore (v. 500 - v. 428 av. J.-C.) : l'Univers s'est formé sans naissance ni destruction, puisque rien ne vient de rien, à partir d'une cause motrice, l'Intellect, qui a mis en branle le cosmos et créé les êtres composés. C'est également à cette époque qu'apparaît l'atomisme, avec Leucippe et son élève Démocrite (v. 460 – 370 av. J.-C.), qui postulent que les seules réalités sont des éléments insécables – les atomes – et le vide. Les objets sont créés par la position et l'arrangement des atomes entrant en collision dans le vide où ils se meuvent.

Le monde grec du Ve siècle avant notre ère produit une grande diversité d'explications causales des phénomènes naturels, et des échanges conceptuels pointus se développent. Athènes, alors à son apogée, devient le centre de l'activité intellectuelle. C'est dans l'école fondée par Socrate, à l'Académie, qu'Aristote (384 - 322 av. J.-C.) se forma et enseigna durant vingt ans. Précepteur d'Alexandre le Grand et fondateur à son tour de l'école du Lycée vers 335 av. J.-C., Aristote, qualifié par Dante de « *maître de ceux qui savent* », a légué à la pensée occidentale une physique d'une envergure et d'une puissance explicative alors inégalées.

Alors que Platon soutenait qu'il n'y avait qu'une science suprême, la dialectique, qui permettait à travers le dialogue de connaître tout ce qui est, *« Aristote livra au contraire une conception départementalisée du savoir, où chaque science n'étudie qu'un seul genre de l'être*, précise David Lefebvre. *La physique ne porte donc plus sur tout ce qui existe comme chez les physiciens ioniens, mais seulement sur les réalités matérielles et mobiles. »* Son champ n'en reste pas moins vaste puisqu'elle concerne aussi bien les phénomènes météorologiques, astronomiques, zoologiques, botaniques que psychologiques.



SPL/SUCRÉ SALÉ

L'Univers selon Démocrite. Cette vue d'artiste du XVIIe siècle illustre les trois régions concentriques du Cosmos imaginées par l'atomiste au Ve siècle avant notre ère : la Terre et les planètes, surplombées par le ciel et les étoiles, le tout entouré d'un « chaos infini » d'atomes.

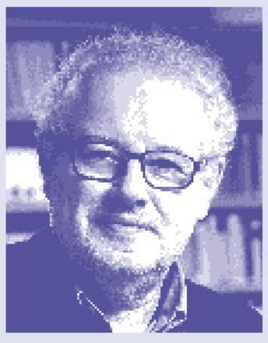
Contre Platon et son idée d'un démiurge façonnant le monde sensible, le regard rivé sur le modèle des Formes intelligibles – seul réel, et que seul l'intellect peut atteindre –, Aristote défend l'intelligibilité et la réalité de notre monde. Si ce monde terrestre n'offre pas le mouvement parfait des planètes dans le ciel, il présente néanmoins certaines régularités sous ses apparences changeantes et trompeuses. La substance (*ousia*), définie comme un composé de matière et de forme – ce qu'une chose est –, constitue le fondement de tous les caractères changeants, ou accidents (quantité, qualité, relation, position…). À travers le changement, la substance reçoit une modification accidentelle, mais reste ce qu'elle est. Ainsi, l'arbre à feuillage caduc perdra ses feuilles à la saison froide, sans cesser d'être le même arbre. Aristote décrit aussi le changement au moyen des concepts clés de puissance et d'acte, la puissance désignant ce qui est virtuellement, et l'acte ce qui s'accomplit ou est pleinement réalisé. Tout être humain est en puissance doué du langage, mais c'est par l'apprentissage d'une langue qu'il actualise cette capacité.

Le Stagirite appuie cette recherche des principes sur une théorie de quatre causes : il est possible d'expliquer un phénomène ou un objet par sa cause matérielle (sa matière), sa cause formelle (ce qu'il est), sa cause motrice (ce qui impulse le changement) et sa cause finale (ce en vue de quoi il existe). Aristote nie que la nature soit animée par le dessein d'une intelligence supérieure, mais il considère que les processus naturels s'ordonnent à une fin immanente, qu'ils portent en eux, telle la graine qui devient un arbre.

Sa théorie des constituants de la matière paraît moins novatrice. *« Aristote rend compte des quatre éléments (eau, terre, feu, air) à partir de deux couples de contraires (chaud/froid, sec/humide) »*, explique David Lefebvre. L'évaporation de l'eau s'explique ainsi par une transformation du froid-humide en chaud-humide. *« Le philosophe a livré là une description du monde extrêmement efficace »*, estime Michel Blay. Si efficace qu'en Occident, à la faveur de la redécouverte des grands textes grecs dont la culture musulmane avait d'abord hérité, *« il sera réintégré dans le savoir des clercs au XIIIe siècle par Thomas d'Aquin. À partir de cette date, Aristote revu par la théologie devient la partie stable de la pensée, et ce jusqu'au XVIIe siècle ! »* Le renversement de cet héritage devra mobiliser des génies de l'envergure de Galilée et Descartes.

FRANÇOIS FOLLIET

LA PHYSIQUE DANS 30 ANS…



JULIEN DANIEL / MYOP

Michel Blay
philosophe et historien des sciences, directeur de recherche émérite au CNRS

Il est impossible d'imaginer ce que sera la physique dans trente ans, mais je crains qu'il ne se passe rien. À cela deux raisons. La première est qu'on ne peut pas prévoir quel sera le changement conceptuel radical qui la remettra en cause. Un nouveau concept peut tout balayer : celui de quanta a modifié toute la physique du XIXe siècle. La deuxième raison est négative : pour qu'il y ait une nouveauté conceptuelle, il faut donner du temps à la pensée. Or en France, les budgets récurrents qui permettent de réaliser des travaux à trente ou quarante ans diminuent, tandis que les projets de l'Agence nationale de la recherche qui glanent le maximum d'argent, tels les projets européens, sont des projets à trois ou quatre ans. Max Planck a travaillé vingt ou trente ans pour fonder la mécanique quantique ! En construisant un nouveau collisionneur pour mille fois le budget qui a permis de dénicher le boson de Higgs, nous trouverons une nouvelle particule, mais cela n'apportera rien. Il faut mettre en défaut le modèle standard de la physique, ce dont aucune des expériences actuelles n'est capable. Nous sommes dans une période monotone, qui presse au maximum les anciens cadres, ceux de la relativité générale et de la mécanique quantique, parce que les enjeux ne sont plus des enjeux de connaissance théorique, mais d'applications technologiques. Il n'y aura pas de génie dans cet environnement. Les génies n'apparaissent que dans un environnement qui soutient la possibilité du travail.

PROPOS RECUEILLIS PAR F. F.

Copernic ou l'aurore d'un grand chambardement

En posant que le Soleil est au centre de l'Univers, l'astronome renverse l'ordre du monde. Un modèle pour Galilée, Descartes ou Newton qui, en quelques décennies, vont façonner les outils de la science moderne.

Il a marqué l'histoire du Saint-Siège, de l'Église et de la science. Au XVIIIe siècle, Prospero Lambertini, plus connu sous le nom de Benoît XIV et surnommé le *« pape des Lumières »*, a en effet ouvert la religion chrétienne aux nouvelles représentations du monde. En 1741, peu après que l'astronome britannique James Bradley a démontré expérimentalement la révolution de la Terre autour du Soleil, il autorise officiellement l'impression de l'œuvre complète de Galilée, un acte qui désavoue les condamnations du scientifique par le Saint-Office au siècle précédent. Seize ans plus tard, il lève l'interdit sur les ouvrages défendant l'héliocentrisme – le Soleil au centre de l'Univers. Ce faisant, il légitime aux yeux de la chrétienté une révolution de pensée initiée trois siècles plus tôt par des esprits audacieux.

Parmi ces derniers, un autre ecclésiastique, Nicolas de Cues, qui se posait en 1440 de dangereuses questions cosmologiques. Mathématicien et philosophe, c'est en effet à cette date qu'il publie *De la docte ignorance*, une œuvre révolutionnaire consacrée à Dieu et à l'Univers. À une époque où domine la philosophie scolastique de Thomas d'Aquin (1225-1274) – selon laquelle seul Dieu est infini, et non sa création –, le prélat est l'un des premiers à considérer que le monde est d'une grandeur incommensurable, sans limite finie, contrairement à ce qu'avançaient nombre de philosophes grecs, Aristote en tête. Il en déduit que la Terre ne peut être en son centre et qu'elle n'est pas fixe. Reste que ces idées audacieuses n'échappent pas à l'influence aristotélicienne et demeurent proches du dogme catholique, car le modèle qu'il propose n'est pas mathématisé. Le travail du Cusain passera toutefois inaperçu de son vivant.

À son époque, et depuis près de treize siècles, c'est le modèle géocentrique établi par Ptolémée (100-168) qui domine. Cette vision du monde qui place la Terre au centre du Cosmos, basée sur une approche géométrique permettant de déterminer la position des « astres vagabonds » (le Soleil, la Lune et les planètes autres que la Terre), puise sa physique fondamentale dans les réflexions d'Aristote. Pour ce dernier, le Cosmos est immuable, les vitesses proportionnelles aux forces, et les mouvements rien d'autre qu'un « moyen » pour un corps céleste de se rendre d'un point à un autre.

Les piliers de ce système seront, cette fois définitivement, ébranlés en 1543 avec la publication de *Des révolutions des orbes célestes*. L'œuvre du chanoine polonais Nicolas Copernic (1473-1543) propose un Cosmos au centre duquel trône le Soleil. Elle suggère aussi que notre planète est sujette à un double mouvement : sa

SPL/SUCRÉ SALÉ

La Terre, planète ordinaire. En 1543, Nicolas Copernic ose placer le Soleil au centre du monde. Idée impensable pour l'Église : son ouvrage, *Des révolutions des orbes célestes*, sera mis à l'index jusqu'en… 1757.

LEEXTRA/OPALEPHOTO

« MONTAIGNE EST L'UN DES PREMIERS A ACCUEILLIR FAVORABLEMENT CETTE THÉORIE. NON PARCE QU'IL LA JUGE CORRECTE SUR LE PLAN ASTRONOMIQUE, MAIS PARCE QU'ELLE RELATIVISE LA PLACE DE L'HOMME DANS LE MONDE »

Jean-Pierre Luminet, astrophysicien

rotation propre et sa révolution autour de cet astre. L'écho de cette théorie posera les bases d'une profonde remise en question des axiomes régissant la perception de l'Univers. *« Il faut toutefois garder à l'esprit que les notions de révolution scientifique et de changement de paradigme n'ont été formulées qu'au XXe siècle, par le philosophe des sciences américain Thomas Kuhn* (lire l'encadré p. 24) *pour caractériser l'astronomie copernicienne,* tempère Jean-Pierre Luminet, astrophysicien et directeur de recherche CNRS au Laboratoire d'astrophysique de Marseille. *Cette révolution tardera en réalité à s'accomplir. Copernic a été méconnu de son vivant. Et pour cause, son ouvrage n'a été publié que l'année de sa mort. »*

Cette nouvelle théorie va d'abord intriguer un nombre limité d'érudits. L'humaniste français Michel de Montaigne (1533-1592) sera l'un des premiers à l'accueillir favorablement. *« Non pas parce qu'il la juge correcte sur le plan astronomique,* précise l'astrophysicien. *Mais parce qu'elle a pour effet de relativiser la place de l'homme dans le monde, comme l'avaient fait les atomistes et les stoïciens face à Aristote. »* À la fin du XVIe siècle et tout au long du XVIIe siècle, plusieurs savants marcheront dans les pas de Copernic. Admirateur de ce dernier, l'astronome danois Tycho Brahe (1546-1601) demeure partisan d'une forme de géocentrisme, mais il s'affranchit de l'idée aristotélicienne selon laquelle existeraient des sphères porteuses des astres, et met un pied dans la science moderne en ayant à cœur de réaliser des observations d'une grande précision. Son disciple et secrétaire, l'Allemand Johannes Kepler (1571-1630), est quant à lui un copernicien convaincu. En étudiant pendant près d'une dizaine d'années les ◆◆◆

Jean-Pierre Verdet, *Une histoire de l'astronomie*, Seuil, 1990

« La révolution copernicienne », conférence de Jean-Jacques Szczeciniarz à l'université de Lille : sciav.fr/copernic

Qu'est-ce qu'une révolution ?

L'histoire de la science est une succession discontinue de théories inféodées à des paradigmes : tel est le concept, aujourd'hui classique, qu'introduisit le philosophe des sciences américain Thomas S. Kuhn (1922-1996) en 1962 lorsqu'il publia *La Structure des révolutions scientifiques.* Selon lui, chaque grand mouvement de science s'enracine dans un modèle démontré et cohérent reposant lui-même sur un ensemble d'observations et de résultats faisant consensus, modèle à partir, et en respect duquel, sont formulées les théories. Ceci, jusqu'à ce qu'une accumulation d'anomalies impossibles à expliquer dans le cadre du paradigme en place mette ce dernier en défaut, conduisant à son renversement – la physique quantique, et les problèmes irrésolus de la physique classique qu'elle permet d'expliquer, en est un bel exemple. Il se produit alors une rupture qui pousse les disciplines à se réformer à partir des principes nouvellement démontrés et admis. Pour illustrer ce concept, Thomas S. Kuhn prend l'exemple de la révolution mécaniste ou copernicienne, qu'il désigne comme l'archétype de la révolution scientifique. Il suivait en cela le philosophe prussien Emmanuel Kant (1724-1804) qui, deux siècles plus tôt, avait baptisé « révolution copernicienne » la mise au point du système héliocentrique.

◆◆◆ mouvements de Mars, il conclut que l'orbite des planètes autour du Soleil ne suit pas une trajectoire circulaire, mais elliptique. En découlent des relations mathématiques – les lois de Kepler – qui régissent les mouvements des planètes ; l'Univers, au lieu de n'être qu'un Cosmos inintelligible, commence donc à être mathématisé. Et le calcul devient l'outil principal de ces érudits décidés à mettre en lumière les recoins les plus sombres du monde.

Cette révolution n'allait pas faire son chemin sans conséquences. Le philosophe et frère dominicain Giordano Bruno (1548-1600) fut de ceux qui en payèrent le prix fort. Parmi les premiers à redécouvrir les travaux de Nicolas de Cues, le Napolitain s'intéresse aux écrits de Copernic. Séduit par l'idée de l'infini, il affirme qu'aucun astre n'est au centre de l'Univers, puisque ce dernier s'étend également dans toutes les directions, sans limites. Selon lui, toutes les étoiles sont des soleils, et une quantité innombrable de mondes semblables à la Terre existent : l'homme, et les astres qui l'entourent, ne serait donc pas la préoccupation principale de l'Univers ! Pis encore, l'Univers n'aurait pas de préoccupation ! Bruno se penche aussi sur la question des mouvements, substituant à l'approche aristotélicienne une approche relativiste par laquelle on ne peut étudier le mouvement d'un corps qu'en relation avec un référentiel. Son esprit de révolte contre le cadre théologique le conduira… sur le bûcher du Campo de' Fiori, à Rome. Cette condamnation ouvre le bal de la répression, par l'Église, des idées novatrices qui remettent en question tant ses préceptes fondamentaux que les Écritures.

Quelques années plus tard, Galilée (1564-1642) en fera lui aussi les frais, et ne devra sa vie qu'à une prudente rétractation. Le physicien italien produit quantité d'observations grâce à un remarquable instrument, la lunette astronomique, qu'il perfectionne : les satellites de Jupiter, les taches solaires en perpétuelle évolution, de nouvelles étoiles… autant de découvertes qui renforcent la théorie d'un Univers bien éloigné du Cosmos immuable qu'avait conçu Aristote. La lunette allait avoir un effet retentissant car elle était accessible à tous. L'écho de la révolution copernicienne pouvait désormais se faire entendre au-delà du cercle restreint des astronomes et philosophes confirmés. Impensable pour l'Église, dont la machine répressive reprit du service : en 1616, les écrits coperniciens furent interdits ; puis, en 1633, pour avoir poursuivi ses travaux sur l'héliocen-

Astronome observant le ciel à la lunette. Illustration tirée de l'ouvrage *Selenographia, sive Lunae descriptio* (1647) dans lequel l'astronome polonais Johannes Hevelius a établi la première carte de la Lune.

BRIDGEMAN IMAGES

trisme, Galilée fut condamné à cesser immédiatement toute activité scientifique et assigné à résidence jusqu'à sa mort, en 1642.

Le triomphe d'une nouvelle vision du monde, entièrement intelligible

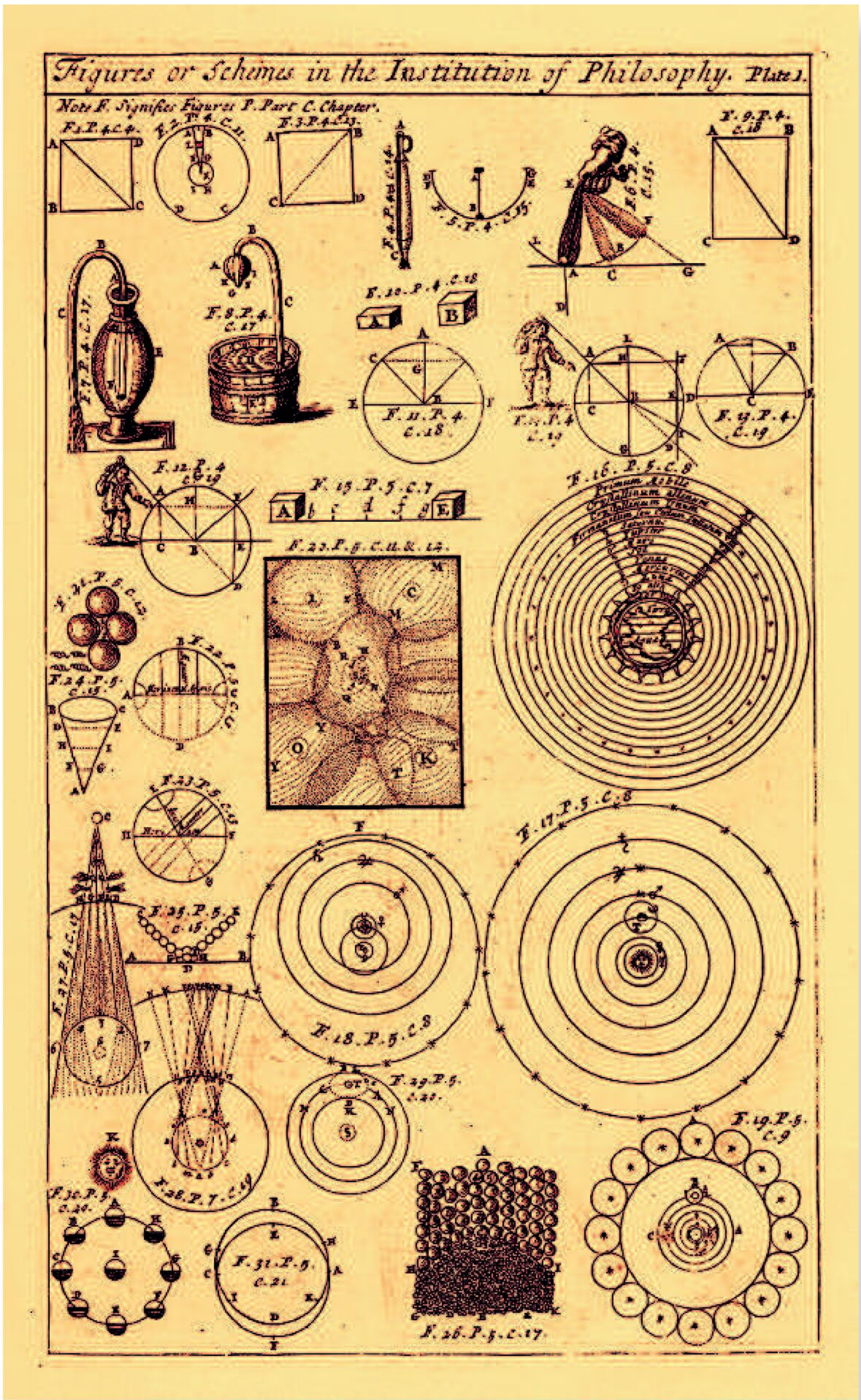
Cette même année naît en Angleterre un certain Isaac Newton (1642-1727) qui posera la dernière pierre à l'édifice copernicien. En se fondant sur les lois établies par Johannes Kepler, il développe sa théorie de la gravitation universelle, qui décrit l'interaction physique à la base de l'attraction entre les corps massifs. Il contribue ainsi à la fondation de ce que nous appelons aujourd'hui la mécanique classique. Ses travaux popularisent la philosophie de René Descartes (1596-1650), selon laquelle tous les phénomènes physiques sont explicables par des interactions entre particules et des principes mécaniques simples. C'est la vision d'un Univers-machine : non, les phénomènes qui se produisent dans l'Univers n'ont pas une fin, un objectif, qui permet de les expliquer. Hélas, à la suite du procès de Galilée, et par crainte de censure religieuse, le mathématicien français ne déclara jamais de son vivant son rattachement à la thèse copernicienne. Son *Traité du monde et de la lumière* ne sera publié qu'à titre posthume.

Cette nouvelle philosophie, pour laquelle il est non seulement possible de décrire les phénomènes physiques comme on le faisait jusqu'alors, mais aussi de les déchiffrer grâce au langage mathématique, pose également les bases de la connaissance expérimentale, selon l'épistémologue français Georges Gusdorf : puisque les phénomènes n'ont pas de « raison d'être » finale, il faut procéder par l'expérience pour comprendre comment, mécaniquement, mathématiquement, ils se produisent. Une approche qui signe le triomphe d'une nouvelle vision du monde, devenu une *« combinaison de matière et de mouvement, docile aux exigences du calcul »*, entièrement intelligible.

Après Newton, et en suivant ce principe mécaniste, les physiciens œuvrèrent à expliquer d'autres phénomènes en mettant au jour les lois qui les régissent : la lumière, le magnétisme, la chaleur ou encore l'électricité. Plus d'un siècle et demi après sa publication, la théorie copernicienne avait donc profondément réformé la pensée scientifique au sens large. Pour Jean-Pierre Luminet, *« l'originalité la plus profonde de la révolution copernicienne n'est pas la théorie héliocentrique car, après tout, des savants et philosophes grecs comme Aristarque de Samos l'avaient proposée deux mille ans auparavant. Non, il s'agit plutôt de ce qu'on appelle aujourd'hui le principe copernicien, selon lequel il n'y a aucune position privilégiée dans l'Univers – que celui-ci soit fini ou infini. Cela ne peut que minimiser la place et l'importance de l'homme dans le monde, aussi bien dans l'espace que dans le temps »*.

Depuis, la physique, mais aussi la science au sens large, s'efforce de se construire en suivant ce principe. La théorie de l'évolution de Darwin, par exemple, est bâtie en partie sur ce nouveau paradigme, tout comme la cosmologie relativiste moderne. L'Univers aristotélicien a cédé sa place à un monde plus vaste et plus cohérent.

WILLIAM ROWE-PIRRA



SPL/SUCRÉ SALÉ

Les Principes de la philosophie de René Descartes. Cet extrait d'une édition publiée en 1699 illustre la conception du philosophe selon laquelle les phénomènes physiques sont explicables par des principes mécaniques simples.

Comment Einstein, en dix mois, changea la face du monde

Entre avril 1905 et janvier 1906, le jeune employé du Bureau des brevets de Berne publie cinq articles qui bouleversent les conceptions de l'espace, de la matière et du temps.

Quel rapport peut-il bien y avoir entre l'eau sucrée, la découverte des photons, des grains de pollen en suspension dans un fluide et l'équivalence de la masse et de l'énergie résumée par la célébrissime équation $E = mc^2$? « *Le lien*, s'amuse Jean-Pierre Luminet, astrophysicien à l'Observatoire de Paris-Meudon, *c'est tout simplement l'année 1905, pendant laquelle le jeune Einstein s'est attaché à résoudre une série de problèmes posés par les physiciens de son époque.* »

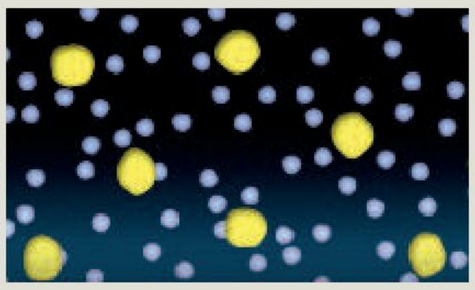
Le XIXe siècle venait de s'achever sur une unification véritablement grandiose. « *Bien que peu connus du grand public*, souligne Jean-Pierre Luminet, *les géniaux travaux de l'Autrichien Ludwig Boltzmann sur la théorie cinétique des gaz et la théorie atomique avaient profondément marqué les physiciens de l'époque.* » Tout, de la chimie à la thermodynamique, de l'optique à l'électricité, semblait en définitive se réduire à la vénérable mécanique de Newton. Le monde s'expliquait entièrement par le carambolage de petites billes dures – atomes et molécules – plongées dans l'éther, la substance qui, pensait-on, constituait le support des phénomènes électromagnétiques, en particulier des ondes lumineuses.

Mais d'agaçantes difficultés subsistaient. Au printemps 1900, le physicien britannique William Thomson, alias lord Kelvin, avertissait ainsi ses collègues de la Royal Society : la beauté de cette synthèse était « *obscurcie par deux nuages* » *(lire aussi p. 50-53)*. Le premier concernait l'éther, dont les propriétés semblaient décidément absurdes : il fallait l'imaginer extraordinairement rigide vu l'incroyable rapidité des ondes qui s'y propageaient, mais n'opposant aucune résistance au déplacement des corps matériels qui le traversaient ! Dans cette hypothèse, on s'attendait à ce que la vitesse de la lumière apparaisse légèrement réduite lorsque celle-ci était émise dans la direction du mouvement de la Terre à travers l'éther, puisque les ondes devraient alors s'y propager, pour ainsi dire, « à contre-courant » de la mystérieuse substance. Or, rappelait Kelvin, toutes les tentatives visant à détecter ce « vent d'éther » avaient fait chou blanc.

Où les idées de Newton se heurtent aux atomes

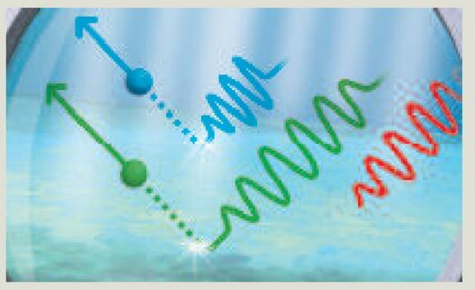
Le second « nuage » concernait la thermodynamique. La synthèse produite par Boltzmann déduisait des lois de Newton que l'énergie d'un système devait être équitablement répartie dans chacune des manières différentes qu'il a de la stocker, ce qu'on appelle un « degré de liberté ». Dans un gaz, par exemple, les molécules s'agitent en tous sens dans le récipient, vibrent individuellement, tournent sur elles-mêmes, etc. Autant de mouvements différents, dont les énergies respectives doivent contribuer de façon égale à l'énergie totale du système. Les propriétés thermodynamiques de divers gaz s'accordaient bien à cette théorie… sauf à basse température, où il semblait que les molécules cessaient de vibrer ou de tourner sur elles-mêmes et ne stockaient plus

Les quatre concepts de « l'année miraculeuse »



ENCYCLOPEDIA BRITANNICA

Mouvement brownien La valse du pollen dans l'eau calme est due à l'agitation de molécules alentour. La preuve de l'existence de celles-ci.

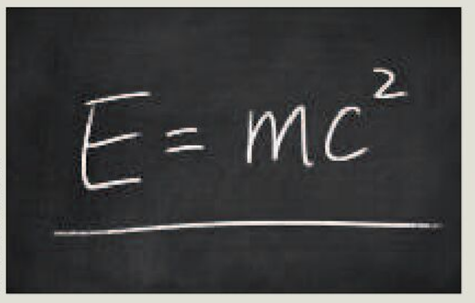


MEHDI BENYEZZAR

Effet photoélectrique Dans certains cas, un métal éclairé acquiert une charge électrique. La preuve que les photons et les quanta d'énergie existent.

SHUTTERSTOCK

Relativité restreinte Espace et temps sont une seule et même chose, la vitesse de la lumière est constante. La preuve que l'éther n'existe pas.



SHUTTERSTOCK

Relation masse/énergie L'équation explique qu'un peu de matière produise une énergie colossale. La preuve par l'énergie atomique.

l'énergie que sous la forme de leur agitation dans l'espace, comme si elles étaient réduites à de simples points sans dimensions. Nous savons aujourd'hui pourquoi : la mécanique quantique impose que l'énergie d'un système ne puisse prendre que certaines valeurs. À basse température, quand l'équitable part d'énergie qui revient par exemple à la vibration devient trop petite pour passer d'un niveau d'énergie à un autre, ce degré de liberté ne participe plus aux échanges énergétiques du gaz. Kelvin, bien sûr, l'ignorait, mais suggérait que, peut-être, les idées de Newton n'étaient plus valides à l'échelle des atomes. Comme le pointe Jean-Pierre Luminet, *« il devenait de plus en plus clair que la mécanique newtonienne et les théories purement ondulatoires de la lumière ne semblaient pas en mesure de dissiper les deux nuages »*.

Pour autant, beaucoup de grands scientifiques en tiraient des conclusions différentes et s'opposaient avec véhémence, pour des raisons philosophiques, à la vision réaliste et mécaniste impliquée par le modèle atomiste. Pour eux, l'hypothèse des atomes avait beau se révéler d'une certaine utilité – limitée – , croire en leur existence *réelle* relevait de la foi du charbonnier.

« On peut penser que le relatif isolement d'Einstein du milieu académique lorsqu'il travaille à Berne, au Bureau fédéral des brevets, lui permet de développer sa pensée "à l'abri" de ces préjugés, admet Jean-Pierre Luminet. *Mais il ne faut pas oublier qu'à la même époque, avec ses amis les mathématiciens Maurice Solovine et Conrad Habicht, il lit assidûment les travaux de gens comme Henri Poincaré – qui a déjà suggéré la formule $M = E/c^2$ au début du siècle –, même s'il ne les citera pas. »*

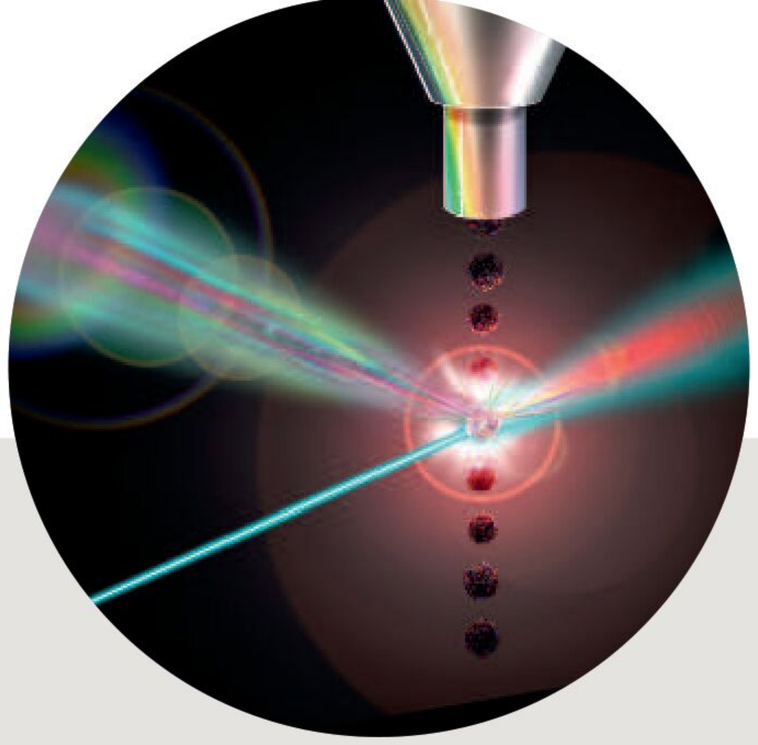
En 1905, Einstein est donc bien préparé pour faire éclater l'orage contenu dans les deux « nuages » de Kelvin, sous la forme de cinq articles publiés en rafale.

Premier article (c'est la thèse doctorale d'Einstein) : en étudiant l'augmentation de la viscosité de l'eau à mesure qu'on y dissout du sucre – un peu, dirions-nous, comme la circulation automobile perd en fluidité à mesure qu'on y ajoute de volumineux camions –, il est possible de mesurer la taille des molécules de glucose. Troisième article (nous reviendrons plus loin sur le deuxième) : pourquoi des grains de pollen en suspension dans une eau parfaitement immobile sont-ils agités d'un mouvement erratique incessant (dit « brownien ») ? Parce qu'ils sont plongés dans une cohue frénétique de molécules. Autrement dit, souligne Jean-Pierre Luminet, *« Einstein s'inspire ici des travaux de Boltzmann pour prouver l'existence réelle des molécules »*. La granularité de la matière n'est donc pas qu'une utile vue de l'esprit…

Deuxième article : il se pourrait bien qu'une telle granularité soit aussi une propriété de la lumière. Une autre difficulté du modèle mécaniste classique – liée elle aussi à l'hypothèse de l'équipartition de l'énergie – était qu'il ne parvenait pas à expliquer comment la lumière émise par un ◆◆◆

Albert Einstein à Berne en 1905, l'année charnière où le jeune physicien lance ses premiers pavés dans la mare aux certitudes newtoniennes.

PHOTO12/ALAMY/BILL WATERSON



SPL/SUCRÉ SALÉ

Les propriétés du laser permettent de compter une à une des particules en suspension dans un fluide.

Et le grand-père du laser est…

En 1916, Einstein s'est de nouveau intéressé aux quanta de lumière, les photons, dont la découverte résolvait non seulement le mystère de l'effet photoélectrique mais aussi le spectre de la lumière émise par un corps incandescent. La théorie classique prévoyait que l'énergie lumineuse émise dans les hautes fréquences tendait absurdement vers l'infini – ce qu'on appelait la « catastrophe ultraviolette ». La solution était que dans un corps chaud, un atome suffisamment agité peut certes restituer son énergie en émettant un photon ultraviolet très énergétique, mais qu'il est alors pour ainsi dire « vidé », et ne peut plus contribuer au rayonnement. La lumière émise se trouve ainsi limitée dans les hautes fréquences. Mais qu'est-ce qui empêche le même atome de se débarrasser de son énergie en émettant une kyrielle de photons infrarouges de basse fréquence ? Einstein comprend que la formule du rayonnement découverte par Planck cache une propriété des photons jusque-là inconnue : une certaine tendance à s'imiter les uns les autres (les photons émis tendent à ressembler à ceux qui se trouvent déjà dans le rayonnement). Pour être précis, il montre que si un atome excité reçoit un photon dont la fréquence lui aurait permis d'atteindre son niveau d'énergie s'il ne s'y était déjà trouvé, il se désexcite en émettant un nouveau photon rigoureusement identique au premier. Cette « émission stimulée », comme il l'appelle, permettra bien plus tard de créer des cascades de photons tous identiques, les faisceaux lasers, premiers phénomènes purement quantiques observables à l'échelle macroscopique et outils indispensables à l'étude des mystères de l'infiniment petit.

◆◆◆ corps incandescent se répartit suivant ses différentes fréquences possibles : ce qu'on appelle le « rayonnement du corps noir ». En 1900, Max Planck avait établi une formule qui semblait impliquer que pour chaque fréquence, l'énergie lumineuse était émise par « paquets », ou quanta, dont l'énergie était égale à une certaine constante h fois ladite fréquence (notée par la lettre grecque « nu » ν) : $E = h.\nu$. Et ce détail, dont il ne s'était pas aperçu tout de suite, heurtait ses convictions anti-atomistes profondes : pas plus que les atomes, de telles particules ne pouvaient selon lui être considérées comme réelles…

Cinq ans plus tard, Einstein étudie les propriétés thermodynamiques du rayonnement de Planck et montre qu'il se comporte en effet exactement comme un gaz formé de particules individuelles d'énergie $h.\nu$, des « grains de lumière », qu'on appellerait bientôt photons. Incidemment, fit-il remarquer, cela explique le mystère de l'effet photoélectrique : le fait qu'aussi intense soit-il, un rayonnement infrarouge de basse fréquence est incapable d'électriser un métal, alors que des ultraviolets de haute fréquence – même d'intensité très faible – y parviennent. Dans le second cas, les photons sont assez énergétiques pour, individuellement, arracher des électrons aux atomes…

N'avions-nous pas dit que la lumière est une onde se propageant dans l'éther ? Il se trouve, répond en substance Einstein dans son quatrième article, que l'éther n'existe pas. Si tel était le cas, des observateurs en mouvement rectiligne et uniforme pourraient constater qu'ils se déplacent par rapport à lui – c'est le fameux « vent d'éther » –, ce qui contredit le principe de relativité selon lequel ils devraient pouvoir toujours se considérer comme immobiles. Par une série de raisonnements d'une remarquable simplicité, il sauve ce principe sur lequel repose toute la physique depuis Galilée : le temps et l'espace absolus n'existent pas, et des observateurs en mouvement les uns par rapport aux autres constatent des durées et des distances différentes. C'est la relativité restreinte. Dans son cinquième article, Einstein suggère que la masse et l'énergie sont deux aspects de la même chose, ce que résume l'équation $E = mc^2$.

Atomes et molécules enfin reconnus !

En quelques mois, Albert Einstein vient de contraindre la communauté scientifique à adopter sans arrière-pensées le modèle moderne de la matière, constituée d'atomes et de molécules, et de lui ouvrir les yeux sur l'existence d'une nouvelle physique. Pour Jean-Pierre Luminet, *« on le sait, ces travaux sont à l'origine des deux grandes révolutions scientifiques du XXe siècle : la relativité et la mécanique quantique »*. Pour autant, l'astrophysicien tient à nuancer : *« Je crois que les problèmes traités par Einstein en 1905 étaient en voie d'être rapidement résolus par les meilleurs physiciens de l'époque, et l'auraient été même sans Einstein. Il faudrait donc leur ajouter la relativité générale, qui englobe la gravitation dans le cadre relativiste et qu'il publie dix ans plus tard. Elle constitue l'apport majeur d'Einstein, et c'est une création vraiment originale. »* En dix ans et dix mois, donc, Einstein aura posé le cadre, jusqu'ici indépassable, dans lequel s'est développée la physique jusqu'à aujourd'hui. **RENÉ CUILLIERIER**

Leopold Infeld, *Albert Einstein. L'évolution des idées en physique*, Flammarion, 2009

Françoise Balibar, *Einstein 1905. De l'éther aux quanta*, PUF, 1992

ALAIN ASPECT

Physicien, professeur à l'université de Paris-Saclay et à l'École polytechnique

« La théorie quantique, la plus fructueuse de l'histoire de la physique »

Le chercheur français, distingué par le prix Nobel de physique 2022 pour ses travaux sur l'intrication des particules, revient sur la révolution qu'a constitué la mécanique quantique dans l'histoire des sciences et les applications inédites qu'elle promet aujourd'hui, au premier rang desquelles figure l'ordinateur quantique.

Le 4 octobre dernier, vous avez reçu le prix Nobel de physique avec vos collègues, l'Américain John Clauser et l'Autrichien Anton Zeilinger. Quel a été votre sentiment lorsque vous avez appris la nouvelle ?
J'ai pensé à tous ceux qui ont rendu ce prix Nobel possible, à commencer par mon professeur de physique au lycée d'Agen qui m'a donné le goût de cette discipline, ainsi qu'aux nombreux enseignants, collègues, étudiants. Aux étudiants en particulier, car lorsqu'on enseigne, on doit expliquer, et l'on comprend mieux ainsi ce sur quoi on travaille. Et j'ai pensé également à John Bell, qui a écrit les inégalités qui ont permis de trancher la controverse entre Einstein et Bohr, sur laquelle nous reviendrons.

La physique quantique est aujourd'hui un « classique », ce qui n'a pas toujours été le cas. Pouvez-vous évoquer un instant ses origines ?
On peut les situer vers 1900, au moment où le physicien allemand Max Planck veut comprendre le « rayonnement du corps noir », autrement dit le fait qu'un corps chauffé émet de la lumière. Les théories ◆◆◆

JOEL SAGET / AFP

◆◆◆ classiques de la physique ne permettent pas d'interpréter les observations expérimentales. Planck trouve alors un modèle « empirique »: il avance que les échanges d'énergie entre le rayonnement et la matière s'effectuent non pas en continu, mais par paquets. Un paquet, c'est un quantum, une quantité élémentaire d'énergie. Einstein entre en scène en 1905 et va plus loin, en posant l'hypothèse que la lumière elle-même est formée de grains, qu'on appellera plus tard photons. Il explique ainsi l'effet photoélectrique, ce qui lui vaudra le prix Nobel de physique en 1921. En 1909, il pose que la lumière a une double nature: elle se comporte à la fois comme une onde et comme un faisceau de particules. C'est une avancée considérable. En 1923, le Français Louis de Broglie généralisera cette propriété au cas des particules matérielles, en faisant l'hypothèse qu'elles se comportent aussi comme des ondes.

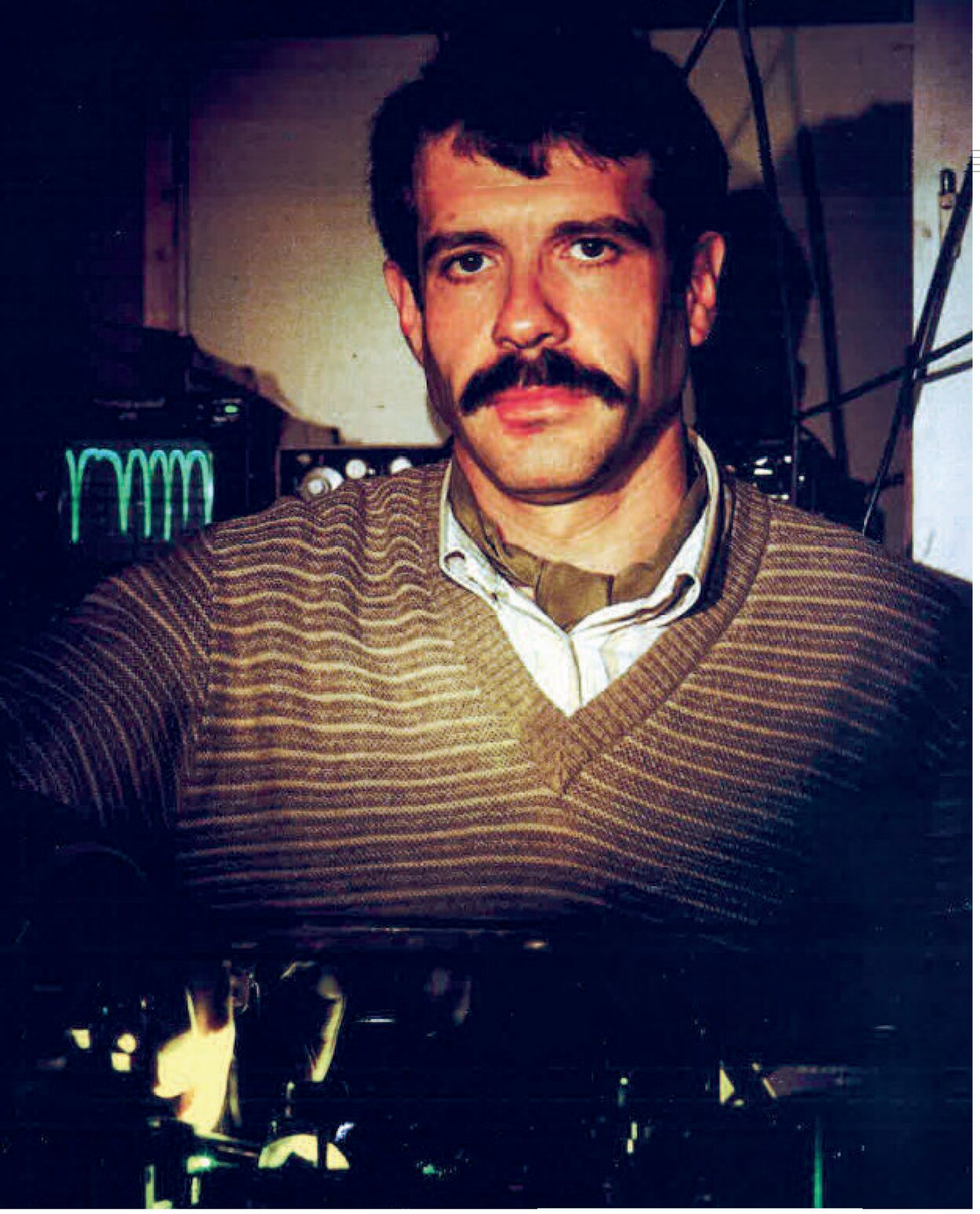
« Cette expérience a montré que même éloignés de 12 mètres, deux photons semblent s'influencer à distance de manière instantanée

Qui sont les autres acteurs de cette nouvelle physique ?
Il y a notamment le physicien danois Niels Bohr [prix Nobel 1922]. En 1913, il propose un modèle de l'atome dans lequel les électrons qui entourent le noyau ont des trajectoires qui ne peuvent prendre que des valeurs précises. Il explique également que l'émission ou l'absorption d'un photon se fait en sautant d'une trajectoire à l'autre. On ne sait pas où il a été chercher ça! Quand on enseigne la physique, on peut passer progressivement de la mécanique classique à la relativité… mais pas à la physique quantique; elle semble venir de nulle part! C'est une rupture conceptuelle incroyable. Par la suite, d'autres physiciens, Heisenberg, Schrödinger et Dirac, se chargeront de consolider et de mettre en forme cette théorie quantique.

Niels Bohr et Albert Einstein s'engagent alors dans une célèbre controverse…
Elle porte sur le fait que la mécanique quantique est probabiliste: une mesure sur un électron peut donner plusieurs résultats possibles – on calcule la probabilité de chaque résultat. Einstein ne prétend pas que la physique quantique est fausse, mais dit qu'il doit exister une théorie sous-jacente plus précise pour décrire les propriétés de chaque objet. Un état quantique ne permet pas de préciser parfaitement à la fois la vitesse et la position d'une particule, qui sont décrites par des lois de probabilité. En utilisant astucieusement le formalisme de la physique quantique, Einstein s'acharne à trouver des situations où vitesse et position sont définies plus précisément que ce que nous disent des lois de probabilité. On cite souvent sa célèbre phrase *« Dieu ne joue pas aux dés »*, qui signifie que si un résultat de mesure est donné par une théorie de façon probabiliste, c'est que la théorie est incomplète, et qu'en réalité, pour chaque particule, vitesse et position sont bien déterminées. Lors des congrès de physique organisés par l'industriel belge Solvay, dont le plus célèbre se déroule en 1927, Bohr réfute les conclusions d'Einstein, de façon convaincante.
Mais ces débats portent à chaque fois sur le comportement de particules quantiques uniques. Comprenant qu'il n'arrivera pas à trouver une faille dans la théorie quantique en restant dans ce cadre, Einstein publie en 1935 avec ses collègues Podolski et Rosen le fameux article « EPR », qui étudie cette fois le comportement de deux particules. Il réalise qu'il existe dans le formalisme mathématique de la physique quantique des états « intriqués », avec des propriétés extraordinaires qu'on appellera plus tard la « non-localité » : même si deux photons intriqués sont très éloignés l'un de l'autre, ils continuent à former un tout qui est plus que la somme de leurs propriétés.

Cela signifie donc que modifier l'état d'un des deux photons, c'est modifier instantanément l'autre ?
Oui, si l'on en reste au formalisme quantique sans le compléter. Mais Einstein ne croit pas à la non-localité, car il a démontré que rien ne peut aller plus vite que la lumière. Pour lui, il faut donc introduire des paramètres supplémentaires, ce qu'on appelle parfois des variables cachées. Sa démonstration dans le papier EPR est très convaincante, à mon avis; la réponse de Bohr, beaucoup plus vague. C'est donc un combat de titans. Mais il ne porte que sur l'interprétation du formalisme. Dès lors, pour la majorité des physiciens, la controverse Einstein-Bohr est purement épistémologique. Elle passe au second plan, alors que la physique quantique permet des progrès extraordinaires dans la compréhension des propriétés mécaniques, électriques, optiques de la matière. C'est aussi la physique quantique qui permet l'invention et la mise en œuvre d'applications indépendantes de cette controverse: le transistor et le laser, qui sont à la base de notre société de l'information et de la communication.
Il faut attendre 1965 pour que le physicien irlandais John Bell démontre que le point de vue d'Einstein est incompatible avec certaines prévisions quantiques, sauf à admettre la non-localité, et qu'une expérience pour le démontrer est possible.

Quel était le principal défi de cette expérience ?
Elle repose sur une source de photons intriqués, deux polariseurs orientables et des détecteurs. Les polari-



PHILIPPE PLAILLY/LOOKATSCIENCES

Alain Aspect, en 1984, dans le laboratoire d'Orsay où il a mené son expérience audacieuse… et donné sa première interview à *Sciences et Avenir*.

seurs permettent de mesurer une propriété du photon, la polarisation, dont le résultat ne peut être que +1 ou -1. Le problème principal était de disposer d'une source efficace. Aux États-Unis, des chercheurs étaient parvenus, de manière très laborieuse, à produire quelques paires. Mais cela prenait des jours et des jours. J'ai eu la possibilité d'utiliser des lasers, alors en plein développement, pour obtenir une source beaucoup plus petite et intense. Avec deux ingénieurs, j'ai mis cinq ans pour la mettre au point, avant d'être rejoint par deux étudiants qui débutaient leur brillante carrière : Philippe Grangier et Jean Dalibard.

Quels résultats avez-vous obtenus ?

J'ai d'abord reproduit les premières expériences des chercheurs américains, avec une bien meilleure précision, puis, en 1982, j'ai utilisé des polariseurs d'un nouveau type et des aiguillages optiques que j'ai construits moi-même. Les deux polariseurs et les détecteurs étaient situés à 12 mètres l'un de l'autre. Pour démontrer sans ambiguïté la non-localité quantique, je changeais l'orientation des polariseurs au dernier moment, afin de prévenir toute influence d'un polariseur sur l'autre. Cette expérience a finalement montré que deux photons, même éloignés de douze mètres, semblent s'influencer à distance de manière instantanée et que la non-localité quantique existe bel et bien. Elle ne sera reproduite par une autre équipe qu'en 1998, en Autriche, tandis qu'en Suisse une équipe montrait que la non-localité survit à une distance de 30 kilomètres ! Attention, cela ne signifie pas pour autant qu'on peut transmettre un signal utilisable plus vite que la lumière. La démonstration, subtile, met en jeu le caractère probabiliste de la théorie quantique.

Quelles sont les conséquences de l'intrication ?

La première révolution quantique, c'était la découverte de la dualité onde-particule et ses applications. La deuxième, c'est l'intrication, et la manipulation d'objets quantiques individuels que l'on apprend à intriquer : un seul atome, un seul photon ou une paire de photons, un seul ion… Un système intriqué est beaucoup plus riche que la somme des propriétés des particules qui le composent. Le gain est exponentiel, au vrai sens du terme. Apparaît alors la notion de « bit quantique », les fameux qubits, que l'on peut intriquer pour réaliser un ordinateur quantique, et dont l'idée a été lancée en 1982 par le physicien américain Richard Feynman. Avec 100 bits quantiques intriqués, on pourrait stocker une quantité d'information dont le codage dans un ordinateur classique demanderait un nombre de bits classiques supérieur au nombre de particules de l'Univers entier ! Cela fait rêver. Mais il faudrait 100 bits quantiques parfaits, qu'on est incapable de produire aujourd'hui. En attendant, des technologies quantiques, certes moins extraordinaires, sont mises au point dans les laboratoires puis développées commercialement par des start-up françaises… dont plusieurs ont été créées par mes anciens thésards.

Quelles sont ces autres applications ?

Un exemple intéressant est la cryptographie quantique. Elle fonctionne, même si elle est difficile à mettre en œuvre. Dans la cryptographie classique, la sécurité repose sur le postulat que l'adversaire qui cherche à décoder votre message secret a des ordinateurs ou des théorèmes mathématiques qui ne sont pas supérieurs aux vôtres. En cryptographie quantique, on n'a pas besoin de cette hypothèse, la sécurité repose sur les lois fondamentales de la physique quantique. Des démonstrations en ont déjà eu lieu notamment en Europe et en Chine.

Y a-t-il de nouveaux défis théoriques pour les physiciens quantiques ?

La compréhension de plus de deux objets quantiques intriqués en présence de perturbations extérieures reste un défi, qui pourrait conduire à des ordinateurs quantiques basés sur des bits quantiques imparfaits. C'est un travail théorique, qui mobilise de nombreux chercheurs. La physique quantique est déjà la théorie la plus fructueuse de l'histoire de la physique et elle nous réserve certainement de nouvelles surprises. La seconde révolution quantique ne fait que commencer.

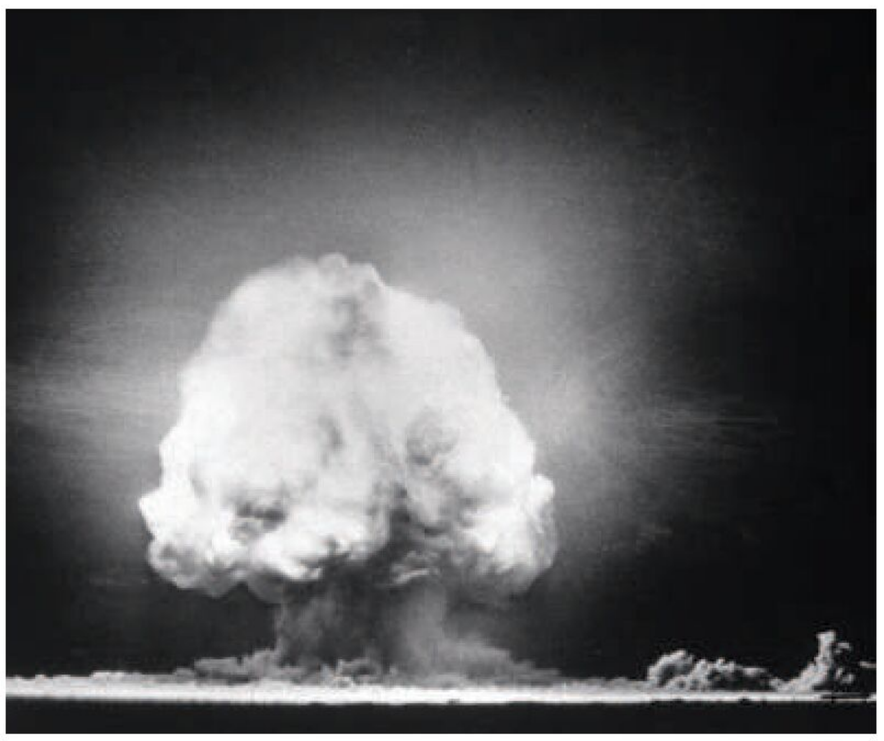
PROPOS RECUEILLIS PAR JEAN-FRANÇOIS HAÏT

Le projet Manhattan ou la fin de l'innocence

Le 16 juillet 1945 explosait la première bombe atomique, mise au point grâce à l'expertise de physiciens hors pair. La science démontrait ainsi sa toute-puissance… et sa subordination aux militaires. Une collaboration ambiguë, toujours d'actualité.

« Je suis devenu la Mort, qui anéantit les mondes. » Telle est la citation tirée du poème indien la *Bhagavad-Gita* qui s'est imposée à l'esprit du physicien Robert Oppenheimer, l'un des pères du projet Manhattan, le 16 juillet 1945, au moment de l'explosion de Gadget, la toute première bombe atomique de l'Histoire. Ce jour-là signait, sur le champ de tir d'Alamogordo, au Nouveau-Mexique, le renoncement de la science à sa vocation première, celle d'éclairer l'humanité. Des scientifiques avaient participé à la conception de la plus puissante arme de destruction de tous les temps… Bientôt, les 6 et 9 août, Little Boy et Fat Man seraient lâchées sur Hiroshima et Nagasaki.

La science moderne doit encore aujourd'hui une partie de sa forme et de son influence, mais aussi de la méfiance qu'elle suscite, à la Bombe. *« Le rôle central que la science a exercé dans la proposition, le développement et la fabrication de cette arme à caractère technologique l'a élevée au rang de domaine stratégique, ce qui a profondément modifié son mode d'organisation tout en fixant pour longtemps certains choix industriels »*, résume Harry Bernas, ancien directeur du Centre de sciences nucléaires et de sciences de la matière (CNRS-Paris-Saclay). D'autant que, sitôt la paix signée, les alliés d'hier allaient instaurer une course aux armements sur fond de menace d'holocauste nucléaire…



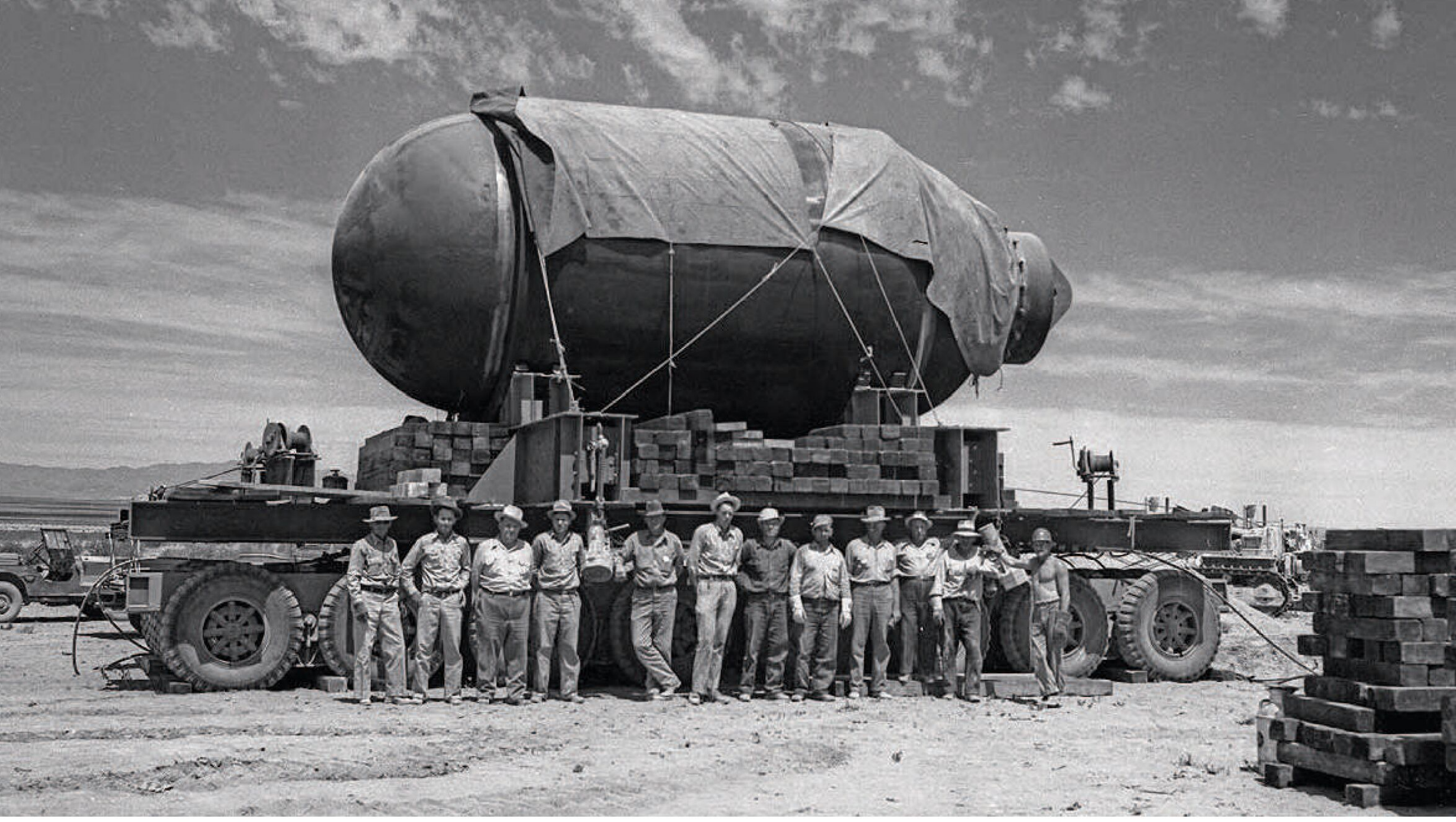
ATOMICARCHIVE.COM

Répétition générale. En juillet 1945, dans le désert du Nouveau-Mexique, les Américains réalisent le premier essai d'arme nucléaire, Trinity. Nom de code de la bombe : Gadget.

S'étalant sur vingt-sept mois, le fameux projet Manhattan dont va sortir l'engin destructeur n'est pas à proprement parler un programme de physique fondamentale. *« En effet, si toutes ses composantes ne sont pas connues avant guerre – notamment le plutonium, qui ne sera découvert qu'en décembre 1940 –, le principe de la fission nucléaire, sur la base de laquelle fonctionne une bombe atomique, a déjà été décrit par Niels Bohr, l'un des pères de la mécanique quantique, et ses collaborateurs. »* Il s'agit donc plutôt d'une entreprise industrielle de science appliquée, dont les grandes figures de la physique qui s'y sont enrôlées – Hans Bethe, Arthur Compton, Enrico Fermi ou encore John Wheeler – ont généralement hâte d'être libérées pour pouvoir reprendre leurs travaux. Mobilisant 130 000 personnes sur une centaine de sites dispersés sur l'ensemble du territoire américain, elle est inédite par son ampleur… et sa subordination à l'autorité militaire. Toutes sortes de gens y sont impliqués. Des sommités de la physique et de la chimie – parmi lesquels nombre de prix Nobel passés ou à venir – bien sûr. Mais aussi quelques femmes, reléguées à des tâches subalternes de techniciennes, et des cohortes d'étudiants, qu'Oppenheimer est allé personnellement recruter sur les campus : la moyenne d'âge est de 26 ans à peine, et les plus hauts responsables dépassent rarement la quarantaine. Ces physiciens, chimistes et métallurgistes resteront marqués à jamais par leurs séjours dans les laboratoires secrets de Los Alamos, de Chicago ou d'Oak Ridge.

De cette expérience hors norme naîtra la conviction que l'acquisition des connaissances constitue le principal enjeu de sécurité et l'outil de puissance de l'après-guerre. *« De fait,* reprend Harry Bernas*, sitôt la paix revenue, l'industrie se met à embaucher massivement des jeunes diplômés. Et l'armée commence à s'intéresser de près à la recherche scientifique conduite à l'intérieur des universités. Au point de prendre en charge une partie de son financement : jusqu'à 90 % en 1946! »* Les forces armées s'équipent de leurs propres laboratoires, envoient leurs éléments les plus brillants effectuer des thèses sur les campus, et main-

Harry Bernas, *L'Île au Bonheur. Hommes, atomes et cécité volontaire*, Le Pommier, 2022



ATOMICARCHIVE.COM

tiennent un dialogue permanent avec les scientifiques.

Le résultat est un formidable essor de la physique. *« Des inventions comme le laser, le transistor ou même l'ordinateur ont largement bénéficié des travaux réalisés pour le compte des militaires dans les domaines des micro-ondes, de la physique des solides ou encore des télécommunications »*, rappelle le physicien. Grâce au concours de scientifiques de l'Allemagne nazie recrutés aux États-Unis après la victoire des Alliés, les recherches en matière d'hydrodynamisme et de turbulence connaissent de belles avancées. Elles aboutiront bientôt au lancement des premières fusées. Parmi les physiciens américains qui ont participé à la conception de la bombe, une partie va aussi poursuivre ses travaux, conduisant, à partir de 1946, aux essais atomiques réalisés sur l'atoll de Bikini puis, le 1er novembre 1952, au test d'Ivy Mike, la première bombe à fusion, ou bombe H.

« L'histoire de l'énergie nucléaire civile est un peu différente, souligne Harry Bernas. *Les études réalisées en marge du projet Manhattan ont convaincu les chercheurs qu'il serait impossible de s'en servir à court ou moyen terme pour produire de l'électricité de façon sûre et rentable. Mais en 1953, le président Eisenhower prend tout le monde de court en annonçant que les États-Unis sont prêts à fournir des centrales à tout pays qui en ferait la demande. Or, à l'époque et en dehors de la bombe, l'atome n'est utilisé que dans les systèmes de propulsion nucléaire développés pour les sous-marins. C'est donc sur la base de ce dispositif que les militaires créent, à la hâte et sans trop tenir compte au départ des problèmes de sûreté, la filière des réacteurs à eau ordinaire dont sont issus les REP qui équipent de nos jours, par exemple, le parc nucléaire français. »*

Précaution inutile. C'est à l'intérieur de cet énorme cylindre d'acier que devait être placée la bombe. Au cas où les charges de TNT auraient échoué à déclencher l'explosion nucléaire, il aurait empêché le précieux plutonium de se disperser. Les physiciens, confiants, ont finalement décidé de s'en passer.

Certains physiciens s'inquiéteront des dérives mortelles de leur discipline. Notamment dans les années 1950, lorsque la perspective de la mise au point de la bombe H fait planer la menace d'une disparition pure et simple de l'humanité dans un hiver nucléaire. Mais la peur de l'Union soviétique finira par avoir raison de leurs réticences. Au point de les convaincre de participer à la construction de cette nouvelle arme…

Et de bien d'autres encore. Des bombes au napalm larguées sur le Viêtnam aux missiles guidés par satellite employés durant la guerre du Golfe, les arsenaux du monde entier regorgent d'engins qui n'auraient pu être conçus sans le concours des scientifiques. *« Piégés entre leur désir de développer les recherches fondamentales et leur dépendance à l'égard des projets militaires,* conclut Harry Bernas*, ils ont fini par développer un syndrome de cécité volontaire. Syndrome qui pèse encore sur les choix technologiques de nos sociétés. »*

VAHÉ TER MINASSIAN

JF DARS

« PIÉGÉS ENTRE LEUR DÉSIR DE RECHERCHES FONDAMENTALES ET LEUR DÉPENDANCE À L'ÉGARD DES PROJETS MILITAIRES, LES SCIENTIFIQUES ONT FINI PAR DÉVELOPPER UN SYNDROME DE CÉCITÉ VOLONTAIRE »

Harry Bernas, ancien directeur du Centre de sciences nucléaires et de sciences de la matière, CNRS/université Paris-Saclay

Cinq expériences pour comprendre le monde

Au fil des siècles, les erreurs et les découvertes des uns ont donné à d'autres des idées, parfois géniales. Mais de l'oxygène aux couleurs en passant par l'électron, il ne suffisait pas d'y penser… encore fallait-il le prouver !

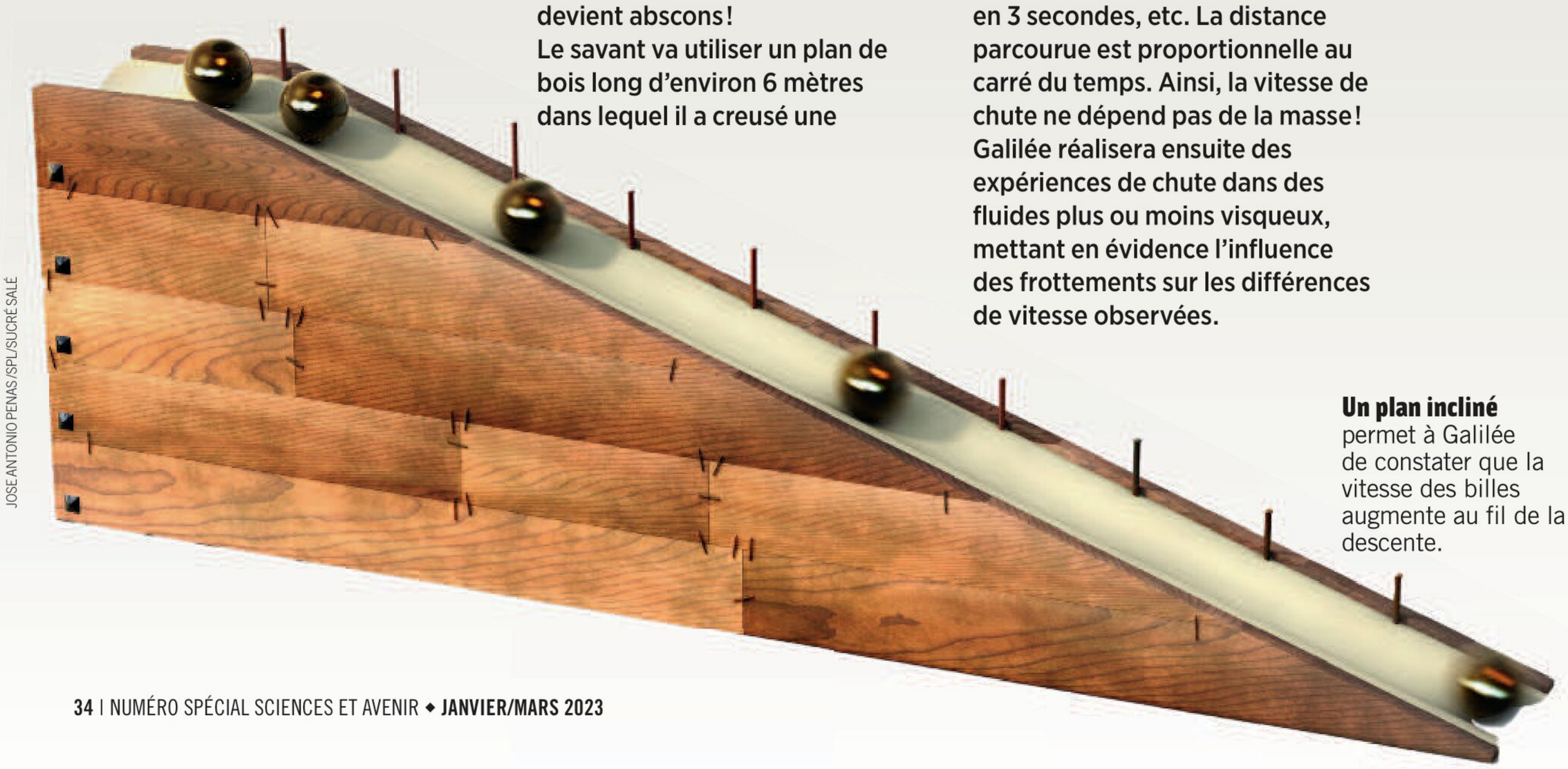
GALILÉE La chute des corps

La vitesse d'un objet en chute libre ne dépend pas de sa masse

Les objets plus lourds tombent plus vite, c'est une évidence ! Pas si simple, dit Galilée, qui le montre en construisant le tout premier dispositif expérimental.

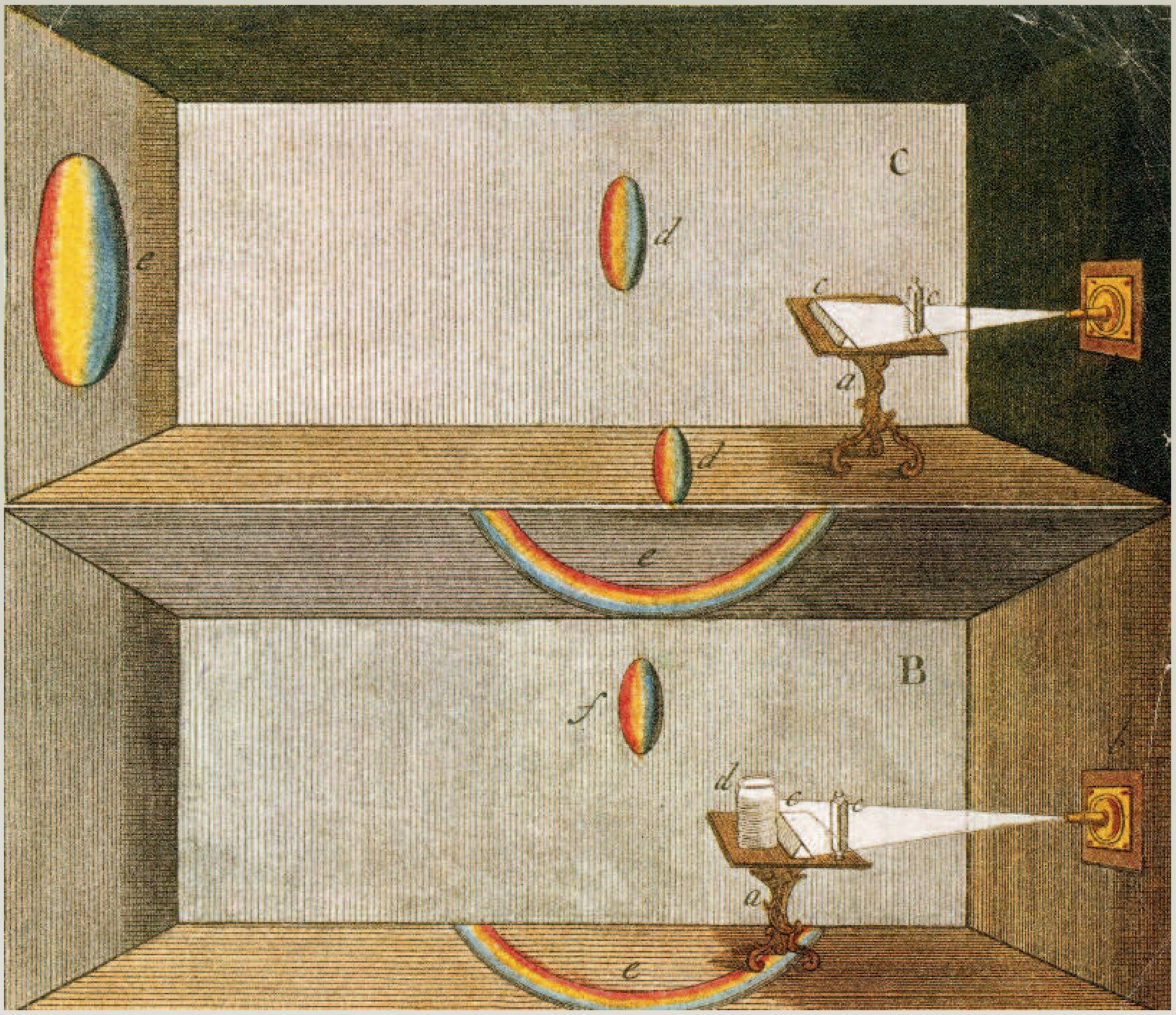
En 1589, à Pise, Galilée cherche à vérifier l'un des postulats aristotéliciens : plus un corps est lourd, plus il chute vite. Ce dont chacun, porté par son bon sens, peut témoigner ! Selon la légende, il aurait laissé tomber différents objets du haut de la Tour penchée. Cependant, les observations ne sont pas aisées. Qui plus est, deux boules de masse différente, en chutant, touchent le sol avec un léger décalage. Ce qui confirme les dires d'Aristote…

Galilée raisonne alors par l'absurde : s'il est vrai que la vitesse de chute croît en proportion de la masse, un objet deux fois plus massif devrait chuter deux fois plus vite. Ce que les observations sont loin de confirmer. Par ailleurs, si l'on relie par une ficelle deux objets dont l'un est plus massif que l'autre, le premier devrait accélérer le second dans sa chute, tandis que celui-ci devrait freiner l'ensemble… Le postulat d'Aristote devient abscons !
Le savant va utiliser un plan de bois long d'environ 6 mètres dans lequel il a creusé une rainure parfaitement lisse. Il mesure à plusieurs reprises, selon l'inclinaison du plan, la vitesse de chute d'une bille en bronze lustré, en utilisant son pouls, une clepsydre et… le son. Enfant de musicien, Galilée a en effet l'oreille exercée et le sens du rythme. Il dispose une série de minuscules grelots sur le trajet de la bille, qui les fait tinter en passant. Lorsque les grelots sont placés à intervalles réguliers, les sons produits sont de plus en plus rapprochés. Conclusion : la vitesse augmente au fil de la descente. En modifiant l'écart entre ces délicates cloches, il finit par les agencer de façon que les sons s'entendent à intervalles de temps égaux. Il montre alors que la bille parcourt une unité de distance en 1 seconde, puis quatre unités en 2 secondes, neuf en 3 secondes, etc. La distance parcourue est proportionnelle au carré du temps. Ainsi, la vitesse de chute ne dépend pas de la masse !
Galilée réalisera ensuite des expériences de chute dans des fluides plus ou moins visqueux, mettant en évidence l'influence des frottements sur les différences de vitesse observées.



JOSE ANTONIO PENAS /SPL/SUCRÉ SALÉ

Un plan incliné permet à Galilée de constater que la vitesse des billes augmente au fil de la descente.



NEW YORK PUBLIC LIBRARY/SPL/SUCRÉ SALÉ

Grâce à un prisme, Newton comprend que la lumière du Soleil est composée de différentes couleurs, et que celles-ci peuvent être recombinées pour former la lumière de l'astre, dite blanche.

ISAAC NEWTON La dispersion de la lumière

Et du prisme jaillirent d'intenses couleurs

L'arc-en-ciel, les irisations d'une bulle de savon… En décomposant la lumière du Soleil en une multitude de nuances, Newton explique ces phénomènes fascinants.

Pour échapper à la grande peste qui s'abat sur Londres, Isaac Newton décide de se mettre au vert dans le domaine familial de Woolsthorpe. En cette année 1665, le jeune homme de 23 ans, frais émoulu de l'université de Cambridge, s'y livre à des expériences qui vont le conduire à percer les secrets de la lumière. Il joue avec l'inclinaison de la lumière sur différents objets et constate que leur couleur change, telles les irisations d'une bulle de savon, ou encore que le jaune réfléchi par une feuille d'or semble virer au bleu lorsqu'on place la feuille entre l'œil et la bougie.

Téméraire, il n'hésite pas à payer de sa personne pour tenter de comprendre comment se fixent les images dans notre esprit. Il glisse une pointe fine et émoussée entre l'arrière de son œil et son orbite et, appuyant légèrement, il observe plusieurs anneaux concentriques, blancs, sombres et colorés, qu'il reproduit en braquant un rayon de lumière sur une lentille légèrement convexe posée sur un verre plat, obtenant une figure de diffraction que l'on nomme les anneaux de Newton.

Poursuivant ses expérimentations, il perce un trou de six centimètres de diamètre dans le volet de sa fenêtre et tient un prisme sur le chemin du faisceau, projetant alors un spectre lumineux sur le mur opposé. Une fois passé le ravissement *« de contempler les couleurs vives et intenses, les bleus devenant des verts, puis des jaunes et enfin des rouges »*, c'est la forme du spectre qui l'interpelle. Comment, à partir d'un trou circulaire, obtient-on une figure rectangulaire ? *« Cette disproportion extrava*gante *excita en moi une curiosité extraordinaire qui me poussa à chercher d'où elle venait. »*

Il fait passer chacun des rayons par un autre prisme. À sa grande surprise, la couleur ne subit aucune altération ! Les couleurs ont donc été déviées par le premier prisme selon des angles différents pour chacune d'elles. Ce n'est pas le prisme qui ajoute la couleur, mais la couleur qui a toujours été présente dans la lumière : celle-ci est polychromatique. Newton la qualifie de *« bâtarde »*, définit une couleur par sa capacité propre à être réfractée – qu'il nomme réfrangibilité – et explique ainsi le phénomène d'arc-en-ciel. Il montrera que les couleurs peuvent se recombiner pour en former d'autres – bleu + rouge = magenta, bleu + vert = cyan, vert + rouge = jaune – et s'additionner pour former une lumière incolore, dite blanche, comme la lumière naturelle du Soleil ou de nos lampes.

Au cours de ses expériences, il découvre que les objets n'ont pas de couleur propre, mais que celle-ci dépend de la lumière qui les éclaire. Éclairée par un rayon rouge, une pomme jaune apparaîtra rouge, une pomme verte… noire. Il conclut : *« Le monde est coloré car il est composé d'objets diversement qualifiés pour réfléchir une sorte de lumière plus qu'une autre. »*

Il faudra toute l'insistance – et les finances – de l'astronome Edmond Halley pour convaincre Newton de publier ses travaux et de les exposer ainsi… en pleine lumière. ◆◆◆

ANTOINE DE LAVOISIER La composition de l'air

Grâce à la découverte de l'azote et de l'oxygène, l'alchimie devient… chimie

C'est en cherchant le phlogistique imaginé par ses prédécesseurs que Lavoisier comprend que l'air est un mélange de gaz.

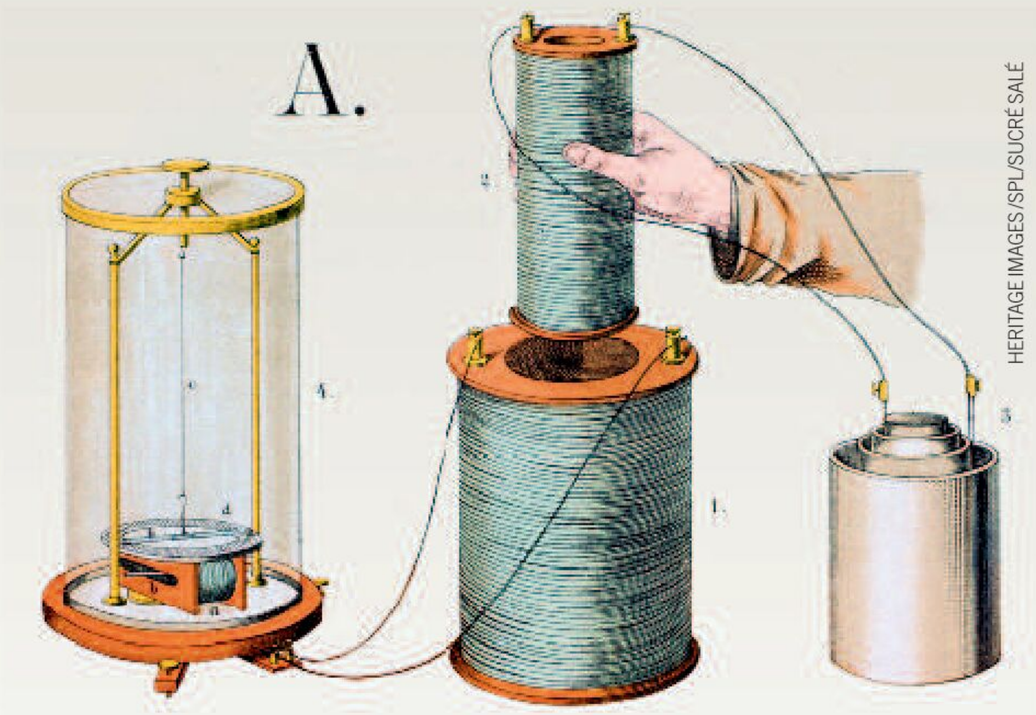
Avec l'entrée d'Antoine de Lavoisier à l'Académie royale des sciences en 1768, la théorie des quatre éléments héritée d'Aristote vit ses dernières heures. Tout comme le phlogistique, cette mystérieuse substance conceptualisée par l'Allemand Georg Ernest Stahl quelques décennies plus tôt. Ce feu contenu dans la matière, et qui s'en échapperait lors de la combustion, est alors très discuté : car comment expliquer que certains métaux calcinés pèsent plus lourd qu'avant leur combustion, alors qu'ils ne contiennent plus de phlogistique ? Celui-ci aurait-il une masse négative ? Pour en avoir le cœur net, Lavoisier suit une approche expérimentale novatrice, rendue possible par l'amélioration récente des balances de précision : il tente de quantifier les gains et pertes de masse des substances à l'issue du processus de combustion. Le chimiste constate que la masse du phosphore ou du soufre ne varie pas lorsqu'on les fait brûler sous cloche. Ce n'est qu'en ouvrant doucement cette dernière qu'on entend siffler l'air qui s'y insinue, et que la masse augmente. La combustion impliquerait-elle une absorption de l'air, et non une libération de phlogistique ? Lavoisier chauffe pendant douze jours du mercure liquide dans un matras, un ballon de verre au corps étroit placé dans un fourneau, qu'il courbe afin que l'extrémité du col émerge d'un bain de mercure placé sous une cloche. À compter du deuxième jour, une croûte rouge apparaît dans le matras. Qui plus est, sous la cloche, le niveau de mercure est monté ! Interloqué, Lavoisier mesure que 1/6e de l'air initial a « disparu ». Il comprend qu'il a réagi avec le mercure du matras pour former le solide rouge.
Il extrait le gaz restant dans le matras et sous la cloche : à son contact, une flamme s'éteint aussitôt. Le chimiste place une souris dans une enceinte remplie de ce gaz : l'animal suffoque !

MICHAEL FARADAY L'induction électromagnétique

Champ magnétique et courant électrique

Après avoir exposé le principe du moteur, Faraday découvre l'induction, engageant le monde dans une révolution… électrique !

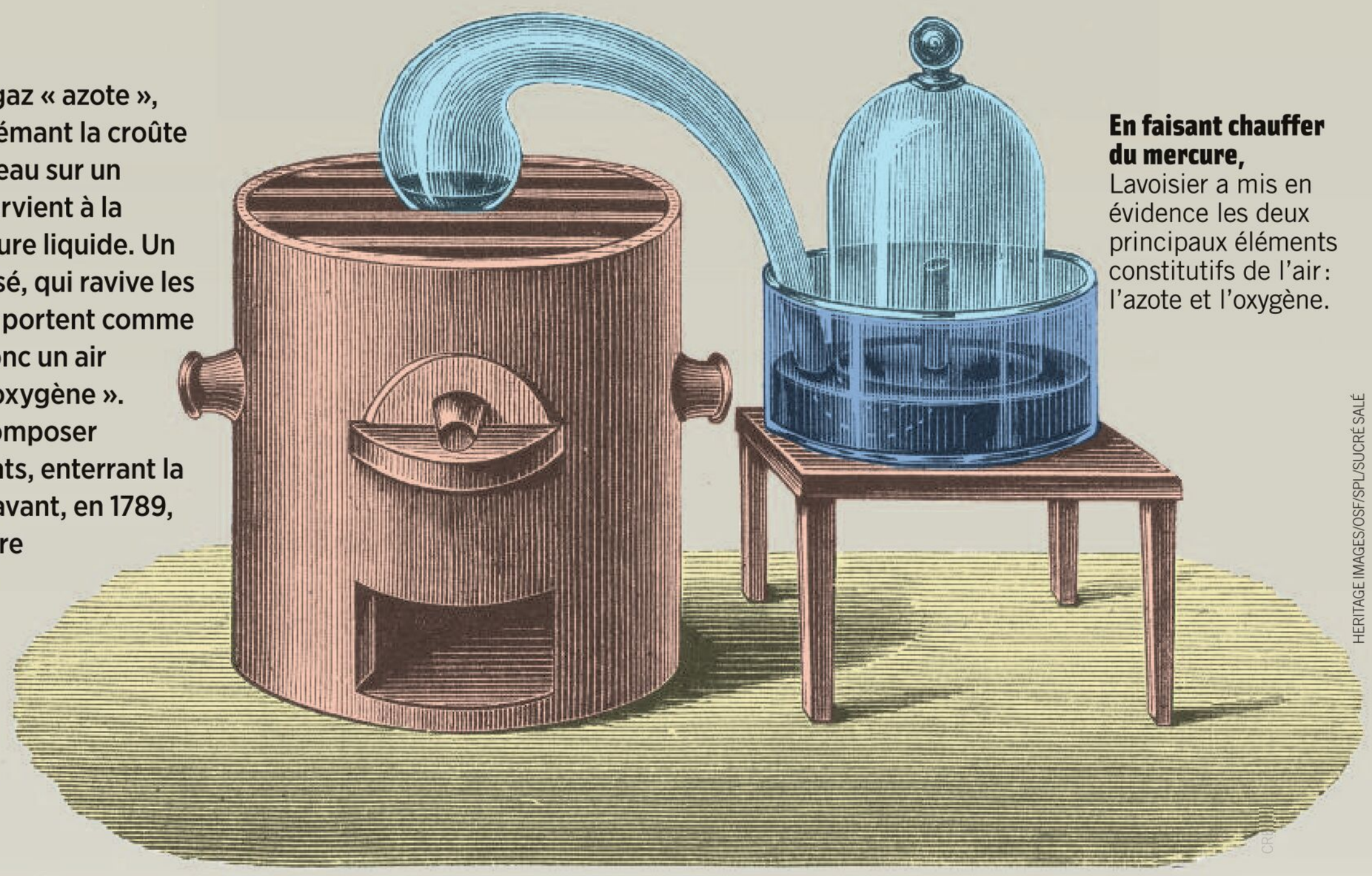
Fils d'un forgeron et d'une apprentie relieuse, le Britannique Michael Faraday (1791-1867) ne reçoit qu'un enseignement rudimentaire. Cela ne l'empêche pas de dévorer les livres de sciences… ni de persuader le chimiste anglais Humphry Davy de l'engager comme assistant. La compréhension des phénomènes électriques n'en est alors qu'à ses balbutiements, et le Danois Christian Ørsted vient tout juste d'établir un lien entre électricité et magnétisme. En 1821, devant la Royal Institution de Londres, Faraday va faire sensation : il dispose un aimant au centre d'une petite cuve emplie de mercure, métal liquide et conducteur d'électricité. Il y fait tremper un fil de cuivre rigide, auquel il connecte une pile : le fil tourne spontanément autour de l'aimant ! Faraday a découvert le principe du moteur électrique : la circulation d'un courant électrique au voisinage d'un champ magnétique provoque le mouvement mécanique.
Le physicien ne s'arrête pas là. Jusqu'en 1831, il va multiplier les expériences pour tenter de mieux comprendre ce mécanisme extraordinaire. Dans l'une d'elles, il enroule deux fils métalliques gainés d'isolant, d'environ 20 mètres chacun, de chaque côté d'un anneau de fer de 2 centimètres d'épaisseur. Les deux bobines sont donc isolées l'une de l'autre. Et pourtant, lorsque cet expérimentateur invétéré branche la première à une pile, la seconde est elle aussi parcourue par un courant électrique. Faraday découvre ainsi l'induction, principe de nos plaques de cuisson, transformateurs électriques et chargeurs de téléphones. Il sera aussi un pionnier de la production d'électricité à grande échelle par déplacement rapide d'un aimant dans une bobine : tant que l'aimant est en mouvement, un courant circule dans le fil enroulé. C'est la base de nos dynamos de vélo, des alternateurs automobiles et des centrales électriques. Ainsi, sans le savoir, a-t-il jeté les fondations d'un monde nouveau, à l'aube de la révolution industrielle.



HERITAGE IMAGES/SPL/SUCRÉ SALÉ

Un courant électrique circulant dans la petite bobine crée un champ magnétique. Dès que cette bobine est insérée dans la plus grosse, un courant est généré par induction.

Lavoisier nommera le gaz « azote », « privé de vie ». En écrémant la croûte rouge qu'il met à nouveau sur un feu nourri, Lavoisier parvient à la retransformer en mercure liquide. Un nouveau gaz est expulsé, qui ravive les flammes : les souris s'y portent comme des charmes… C'est donc un air vital, qu'il baptisera « oxygène ». Lavoisier vient de décomposer l'air en deux constituants, enterrant la théorie des éléments, avant, en 1789, d'anéantir le vocabulaire mystique de l'alchimie en le remplaçant par une nomenclature rationnelle dans son *Traité de chimie*. Il sera ainsi considéré comme le père de la chimie.



En faisant chauffer du mercure, Lavoisier a mis en évidence les deux principaux éléments constitutifs de l'air : l'azote et l'oxygène.

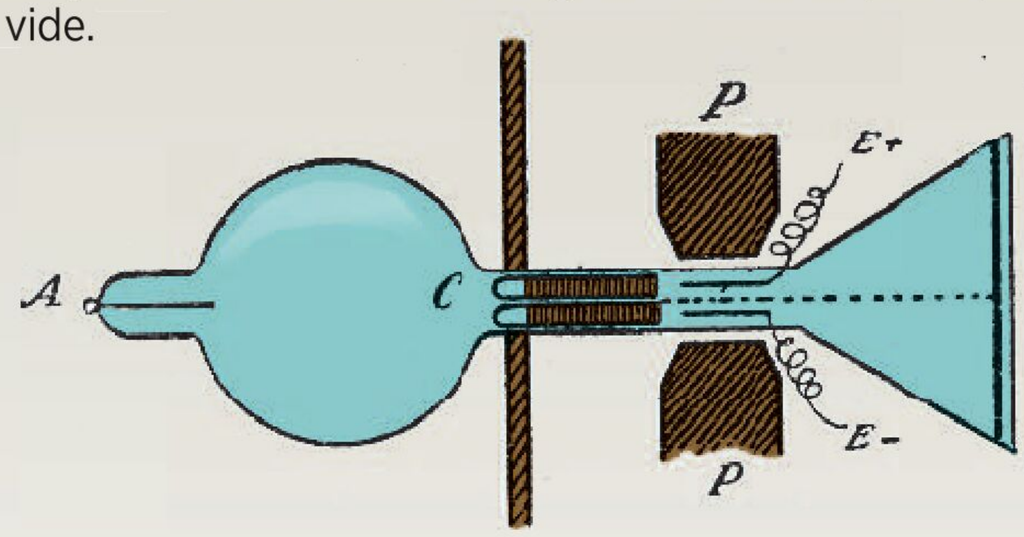
HERITAGE IMAGES/OSF/SPL/SUCRÉ SALÉ

JOSEPH JOHN THOMSON
La structure complexe de l'atome

La découverte de l'électron : un pas de géant dans la construction du modèle atomique

L'atome ? Pas si insécable que les Grecs l'avaient imaginé ! Il se révèle peu à peu complexe… et presque vide.

De quoi est constituée la matière qui nous entoure ? Réponse théorique du physicien John Dalton en 1808, à la suite des anciens Grecs Leucippe et Démocrite : de particules indivisibles qu'on appelle atomes (*atomos*, « insécable » en grec). Mais il faudra attendre les travaux de Joseph John Thomson (1856-1940) pour que ce modèle soit attesté expérimentalement. Le physicien britannique étudie la décharge électrique dans des gaz sous basse pression. Imaginez une sorte de grande ampoule en verre. De l'air – ou un autre gaz – y est enfermé en faible quantité. Dans l'enceinte sont insérées deux électrodes, une cathode reliée à la borne négative d'un générateur, et une anode reliée à son pôle positif. Thomson y applique une tension électrique. Comme son prédécesseur William Crookes (1832-1919), concepteur de ce tube de verre, il observe une étrange lumière diffuse. Pour la matérialiser, il installe un écran tapissé de phosphore sur son trajet, ainsi qu'à l'extrémité de la paroi. Un mystérieux rayon fluorescent apparaît perpendiculairement aux électrodes ! Le plus incroyable reste à venir : Crookes avait déjà montré que le rayon cathodique était dévié lorsqu'on approchait un aimant de l'enceinte. Thomson place deux nouvelles électrodes, alimentées par une autre pile, parallèlement au rayon, et constate que le faisceau est à nouveau dévié vers la borne positive. Le physicien en conclut que les atomes portent en leur sein une charge électrique négative. Il élabore en 1897 son modèle du pudding : l'atome, tel un gâteau, porterait une charge positive globale « dans sa mie », et des grains de raisin disséminés « dans la pâte » seraient les électrons, négatifs. L'atome n'est plus indivisible, ni l'unité fondamentale de la matière. Le modèle de Thomson sera supplanté en 1911 par celui du Néo-Zélandais Ernest Rutherford, qui démontre l'existence d'un noyau 100 000 fois plus petit que l'atome. Celui-ci est donc constitué essentiellement… de vide !



Les expériences qu'a menées Thomson avec des tubes cathodiques lui ont permis de déduire la charge négative des électrons.

UNIVERSAL HISTORY ARCHIVE/UNIVERSAL IMAGES GROUP/GETTY IMAGES

Aux origines orientales de la physique moderne

L'histoire des sciences revendique beaucoup de figures européennes. Mais certaines lois du monde ont été découvertes ailleurs, et bien avant. C'est vers l'Est qu'il faut se tourner pour trouver ces pionniers, dont les travaux ont servi de fondements indirects à la révolution scientifique occidentale.

PHOTO12/ALAMY/THE PICTURE ART COLLECTION

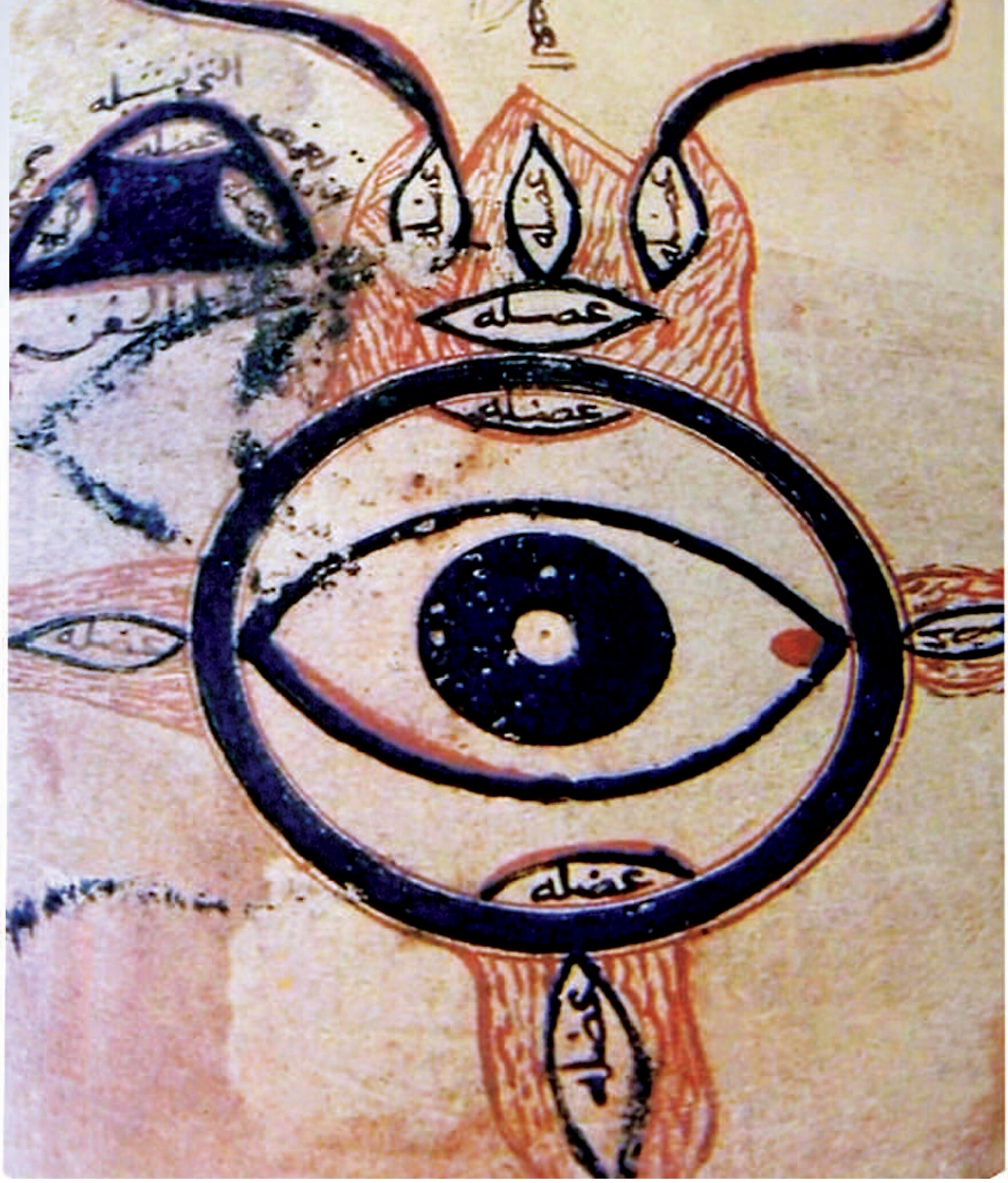
Le jaïnisme représente l'Univers sous la forme d'un homme cosmique. Pour cette école, née en Inde 1000 ans avant notre ère, le Cosmos est constitué de vide et d'atomes qui peuvent se rencontrer, formant des sortes de molécules. Dessin anglais d'après un temple jaïn, art des XV^e^-XVII^e^ siècles.

Parmi les grands noms de la physique, l'histoire a retenu Copernic, Galilée, Kepler ou Newton, considérés comme les fondateurs de la physique moderne, ou encore, bien avant eux, Anaximandre et Aristote *(lire p. 18)*. Mais en Orient, parfois avant même leurs homologues grecs, des esprits affûtés se sont penchés sur le fonctionnement de l'Univers. Leurs apports, parfois fantaisistes, souvent d'une étonnante clairvoyance, ont indirectement contribué aux fondements de la physique moderne.

En Inde, quelque six cents ans avant notre ère, le sage Kanada fondait l'école philosophique Vaisheshika dont l'un des canons propose une discontinuité de l'Univers, fait de vide et d'une matière elle-même composée d'unités indivisibles et inobservables, les atomes. Cela, plusieurs siècles avant le Grec Leucippe ! De même que les philosophes du mouvement jaïniste, né aux alentours du X^e^ siècle avant notre ère, cette école avance l'hypothèse que ces unités peuvent se rencontrer et, en fonction de leur nature, interagir par force d'attraction ou de répulsion, formant des agrégats plus larges et complexes : une sorte de proto-concept de la molécule. Ces idées, qui ne semblent pas se fonder sur un socle expérimental ou une observation directe, s'inscrivent dans une démarche de connaissance à des fins spirituelles et philosophiques davantage que d'acquisition de savoirs purs. Elles n'en constituent pas moins un effort pour comprendre le monde. Ces théories atomistes antiques, clairvoyantes dans une certaine mesure quant à la réalité physique de la matière, s'accompagnent d'une théorie des éléments. Alors que chez les Grecs, Empédocle soutient que la nature est constituée de quatre éléments éternels, l'eau, l'air, le feu, la terre, la philosophie vaisheshika complète ces substances fondamentales par l'éther, et associe leurs propriétés aux sens humains. Ainsi, la terre possède des qualités de goût, de couleur, d'odeur et de toucher, contrairement à l'air, qui ne renvoie qu'au toucher. Plus à l'est, en Chine, on retrouve cette théorie élémentaire dans l'école du yin-yang, portée au III^e^ siècle avant notre ère par le philosophe naturel Zou Yan, à la différence que le bois et le métal y remplacent l'air et l'éther. Les interactions de ces éléments, complexes et dynamiques, forment un système de pensée qui se retrouve dans de nombreux aspects de la vie chinoise et permet d'expliquer les humeurs humaines, les sens comme l'odorat ou le goût, ainsi que de nombreux phénomènes naturels. Selon le sinologue britannique Joseph Needham (1900-1995), les philosophes chinois abordaient la réalité physique comme un organisme général en interaction permanente, dont il serait inutile d'essayer de déterminer l'origine, la cause ou la forme.

Bagdad, carrefour des connaissances chinoises, indiennes, perses, grecques…

Du côté du Moyen-Orient médiéval, les sciences arabo-musulmanes ont longtemps été considérées comme une poursuite, un simple prolongement des réflexions grecques de l'Antiquité. Elles sont en réalité bien plus que cela. La prospérité économique de l'empire omeyyade au VIII^e^ siècle ouvre la voie à un essor renouvelé de la philosophie naturelle, en particulier des mathématiques et de ses applications physiques, À Bagdad, au IX^e^ siècle, sous la dynastie des Abbassides, la Maison de la Sagesse s'ouvre aux savants qui viennent y consulter et traduire des ouvrages anciens grecs, syriaques ou encore sanskrits ; c'est un carrefour où les connais-



FROM HISTORY/UNIVERSAL IMAGES GROUP/GETTY IMAGES

sances des civilisations chinoise, indienne, perse, arabe et grecque sont collectées, copiées et étudiées. C'est ainsi qu'Abu al-Hudhayl (752-841), partisan de la théorie atomiste, introduit celle-ci dans la théologie musulmane, en attribuant les interactions atomiques à une volonté divine. Quant à l'astronome et physicien arabo-persan Alhazen, de son vrai nom Ibn al-Haytham (965-1040), il est considéré comme le père de l'optique *(lire aussi p. 50)*. Inventeur présumé de la chambre noire, il est le premier à énoncer, bien avant Fermat ou Kepler, que la lumière se déplace en ligne droite, que sa vitesse de propagation est finie, qu'elle varie selon la nature du milieu qu'elle traverse et s'affaiblit avec la distance. Il réfute la théorie, qu'avaient défendue Euclide et Ptolémée, selon laquelle l'œil émet de la lumière pour voir, en affirmant que la vision se fonde sur des rayons extérieurs qui pénètrent dans l'œil. Alhazen découvre aussi la cause de nombreux autres phénomènes, notamment que la lumière de la Lune provient du Soleil, et il est à l'avant-garde de la méthode scientifique dans la mesure où il prend soin de valider systématiquement ses hypothèses par l'expérimentation. D'autres marchent dans ses pas, confrontant les théories et conceptions grecques à l'observation et à l'expérimentation, donnant naissance à une véritable raison scientifique arabo-musulmane grâce à laquelle sont faites de grandes avancées dans les domaines de la médecine, mais surtout de l'astronomie. Le pouvoir est en effet prêt à financer massivement cette discipline, entre autres pour son implication dans la vie religieuse et ses applications pratiques, telles que la navigation dans l'océan Indien ou l'établissement des calendriers…

Mais si un désir commun de comprendre la nature habite les penseurs de l'Ouest comme ceux de l'Orient, leur approche n'est pas ◆◆◆

Alhazen, astronome arabo-persan du tournant de l'an mil, est considéré comme le père de l'optique. Il a notamment établi que l'œil n'émet pas de lumière pour voir mais la reçoit de l'extérieur. Détail d'un diagramme du *Kitab al-Manazir* (*Traité d'optique*) d'Alhazen, manuscrit, 1011-1021.

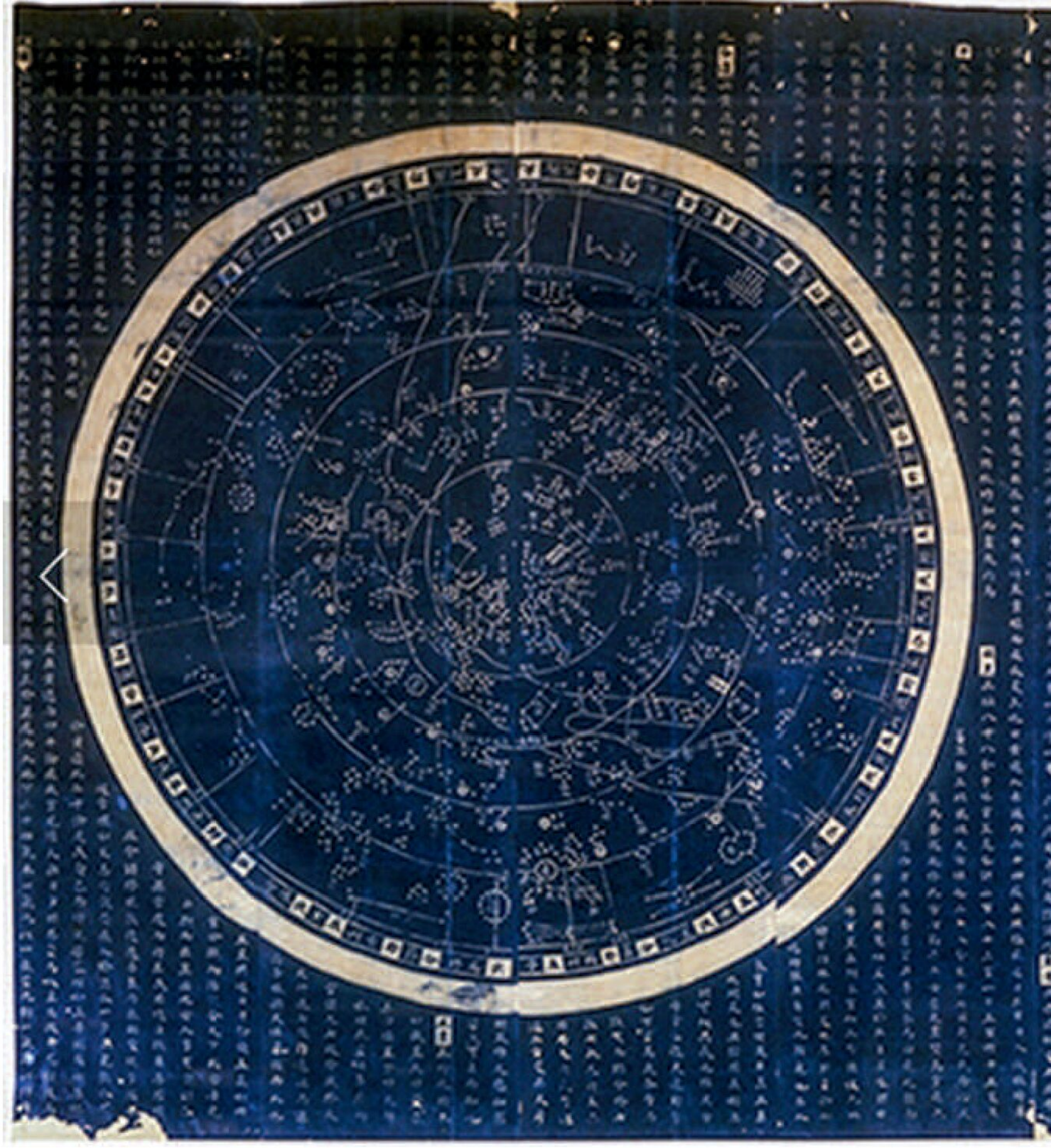
◆◆◆ la même. Le physicien français Michel Soutif illustre ce phénomène par l'exemple des Grecs et des Chinois. D'après lui, l'émergence de la pensée rationnelle se produit à peu près à la même époque au sein de ces deux civilisations, favorisée par le morcellement géographique du pouvoir : cités-États d'un côté, principautés de la période dite des Printemps et Automnes de l'autre. Une fragmentation déterminante, car elle permet aux penseurs de fuir les systèmes qui les oppressent lorsque leurs idées vont à l'encontre du dogme.

L'astronomie, prérogative de l'empereur

On l'a vu, sur la question de la constitution de la matière, l'analogie entre les théories élémentaires d'Empédocle et de Zou Yan est frappante. En revanche, les approches divergent dans l'étude de la mécanique et des mouvements. Les Grecs ont une vision très théorique, chargée de représentations symboliques. Excellant tout particulièrement en géométrie – collégiens et lycéens en ont de beaux exemples lorsqu'ils découvrent Thalès, Pythagore ou encore Archimède –, ils étudient très bien les systèmes statiques. Mais leur difficulté à appréhender le temps comme une variable engendre chez eux une méconnaissance des phénomènes de propagation, comme celui de la lumière.

« *La démarche chinoise est plus pragmatique,* souligne Jean-Marc Bonnet-Bidaud, astrophysicien au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA). *Elle se fonde sur l'investigation du réel par l'expérience. Les savants chinois observent et comparent ; c'est une approche globale, qui s'apparente à celle qui gouverne la science moderne.* » Ils préfèrent notamment l'algèbre à la géométrie, prenant la mesure du monde par le calcul. Cette similitude avec la physique d'aujourd'hui apparaît clairement en astronomie. Les comptes rendus relatant l'observation de supernovas – pour certains vieux de près de deux mille ans – se limitent la plupart du temps à des informations pertinentes, sans théorie préalable.

Cette minutie se retrouve aussi dans leur efficacité à établir des calendriers d'une rare précision. En extrapolant leurs observations par le calcul, ils peuvent mettre en place des éphémérides se projetant sur des centaines d'années. Leur seul outil est l'algèbre, et en particulier des calculs – l'interpolation de deuxième et troisième degré – qui ne seront développés en Occident que des siècles plus tard par Newton. Ce faisant, ils peuvent prédire les éclipses solaires et lunaires à la minute près. « *Ces prédictions sont importantes,* précise Jean-Marc Bonnet-Bidaud, *car pendant longtemps, en Chine, l'astronomie était la prérogative de l'empereur, qui se faisait le gardien de l'harmonie entre la Terre et le ciel par l'interprétation divinatoire de telles observations.* »



BRIDGEMAN IMAGES

Le planisphère de Suzhou, établi en 1193 et gravé dans la pierre en 1247 par Wang Zhi Yuan, est d'une remarquable précision : quelque 1 500 étoiles y sont indiquées, réparties en 280 constellations.

Le principe d'inertie décrit en Chine dès le Ve siècle avant notre ère

De manière générale, les philosophes naturels chinois ont été à l'affût des phénomènes célestes transitoires, comme les comètes, et fixes, comme les taches solaires. Mais ils ont aussi excellé dans l'étude du magnétisme, menée par exemple par le polymathe Shen Kuo (1031-1095), qui décrit en détail l'utilisation du compas à aiguille magnétique, et en mécanique, notamment grâce aux travaux d'une secte pacifique, les Mohistes. Ceux-ci avançaient l'hypothèse, dès le Ve siècle avant notre ère, que « *l'arrêt d'un mouvement est dû à une force opposée. Sans force opposée, le mouvement ne cessera jamais* ». Il faudra attendre deux mille ans pour

« IL NE S'AGIT PAS DE DRESSER UNE HIÉRARCHIE INTELLECTUELLE DES CIVILISATIONS. ELLES BAIGNENT DANS DES MILIEUX ET DES CONTEXTES QUI LEUR PERMETTENT OU NON, À UN MOMENT DONNÉ, D'EXPRIMER LEURS CAPACITÉS »

Jean-Marc Bonnet-Bidaud, astrophysicien

que le principe d'inertie soit formulé de la sorte en Europe…

Dès lors, comment expliquer que la plupart des fondateurs reconnus de la science moderne portent des noms européens ? *« L'Europe a emprunté beaucoup de ses résultats au reste du monde,* note Jean-Marc Bonnet-Bidaud, *une dette qu'il lui faut faire l'effort de reconnaître. Toute sa science se fonde sur des acquis rapidement assimilés au moment de la révolution scientifique, du XVIe au XVIIIe siècle. »* Les astronomes chinois connaissaient l'existence des taches solaires depuis l'an 28 avant notre ère, soit bien avant que Galilée ne les observe, en 1610. Et certains historiens estiment que Copernic, architecte de la théorie héliocentrique, a été influencé par les travaux d'astronomes arabes tels qu'Al-Battani au Xe siècle et Ibn al-Shâtir au XIVe siècle. Si ces derniers avaient une vision géocentrique de l'Univers, les modèles mathématiques qu'ils ont proposés pour le mouvement des planètes sont les mêmes que ceux figurant dans la théorie copernicienne. Mais comment ces idées se seraient-elles transmises par-delà les âges et les frontières, physiques et culturelles ? L'on sait que les connaissances pouvaient se propager sous la forme de manuscrits copiés et diffusés. Or, Copernic a étudié en Italie à une époque où circulait un manuscrit byzantin contenant les théories d'al-Shâtir. A-t-il bel et bien lu cet ouvrage ? Les recherches ne permettent pas de le confirmer.

« Il ne s'agit pas de dresser une hiérarchie intellectuelle des civilisations, conclut Jean-Marc Bonnet-Bidaud. *Elles baignent dans des milieux et des contextes qui leur permettent ou non, à un moment donné, d'exprimer leurs capacités. Or, il faut comprendre que les esprits européens du Moyen Âge étaient chapeautés par une idéologie religieuse leur interdisant dans une certaine mesure d'étudier scientifiquement des sujets dont l'autorité ecclésiastique se faisait la gardienne. La science moderne s'est développée en Europe au moment où la culture a été capable d'assimiler ces notions constitutives et de démuseler sa quête de connaissance. »*

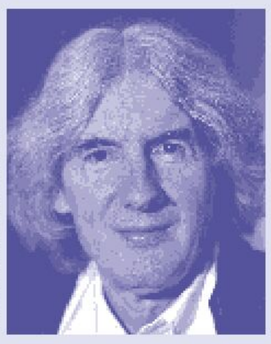
WILLIAM ROWE-PIRRA

Michel Soutif, *Naissance et diffusion de la physique,* EDP Sciences, 2014

Jean-Marc Bonnet-Bidaud, *4000 ans d'astronomie chinoise,* Belin, 2017

« Histoire des sciences dans l'empire musulman », conférence de Pietro Corsi et Ahmed Djebbar en 2005 à la Cité des sciences et de l'industrie à Paris, sciav.fr/sciences-empiremusulman

LA PHYSIQUE DANS 30 ANS…



F. GUÉNET/DIVERGENCE

Jean-Marc Bonnet-Bidaud
astrophysicien français au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA)

La physique est dans une situation très paradoxale. Nous fêtons le centenaire de l'émergence de deux points de vue différents sur la réalité, la relativité et la mécanique quantique. Mais un hiatus nous empêche de réunir ces deux visions. Les écoles de pensée qui se font face évoquent l'écart entre les philosophies antiques grecque et chinoise. D'une part, l'ancienne, portée sur la géométrie et la théorisation du réel, qui s'assimile à la relativité générale, sorte de forme ultime de la physique classique issue de l'Antiquité grecque. D'autre part, un monde nouveau mis au jour par hasard, la mécanique quantique, qui fait éclater les concepts de continuité. L'intrication quantique *(lire p. 29-31)* en est l'un des points les plus spectaculaires. On refuse pourtant d'en entendre la réalité. L'idée qu'une théorie conciliatrice finira par émerger est illusoire. À choisir, je pense que l'avenir de la physique sera fondé sur l'approche de la mécanique quantique. La relativité est en phase de déclin lent, entretenue par une ténacité et un formalisme ancrés dans l'utilité. Il faut accepter que certains rapports de causalité ne sont pas opérants dans le réel. Ils le sont dans notre esprit, car notre physiologie nous soumet à une continuité temporelle. Nous savons pourtant aujourd'hui qu'une grande part de la lumière dans l'Univers nous est invisible. Il en va de même pour la matière et l'énergie. Nous sommes au début d'une investigation qui s'affranchira des fondements logiques dont nous avions jusqu'ici besoin, mais la transition sera difficile, car il est toujours terrifiant de sauter dans le vide.

PROPOS RECUEILLIS PAR W. R.-P.

Cabinet de curiosités : les instruments du savoir

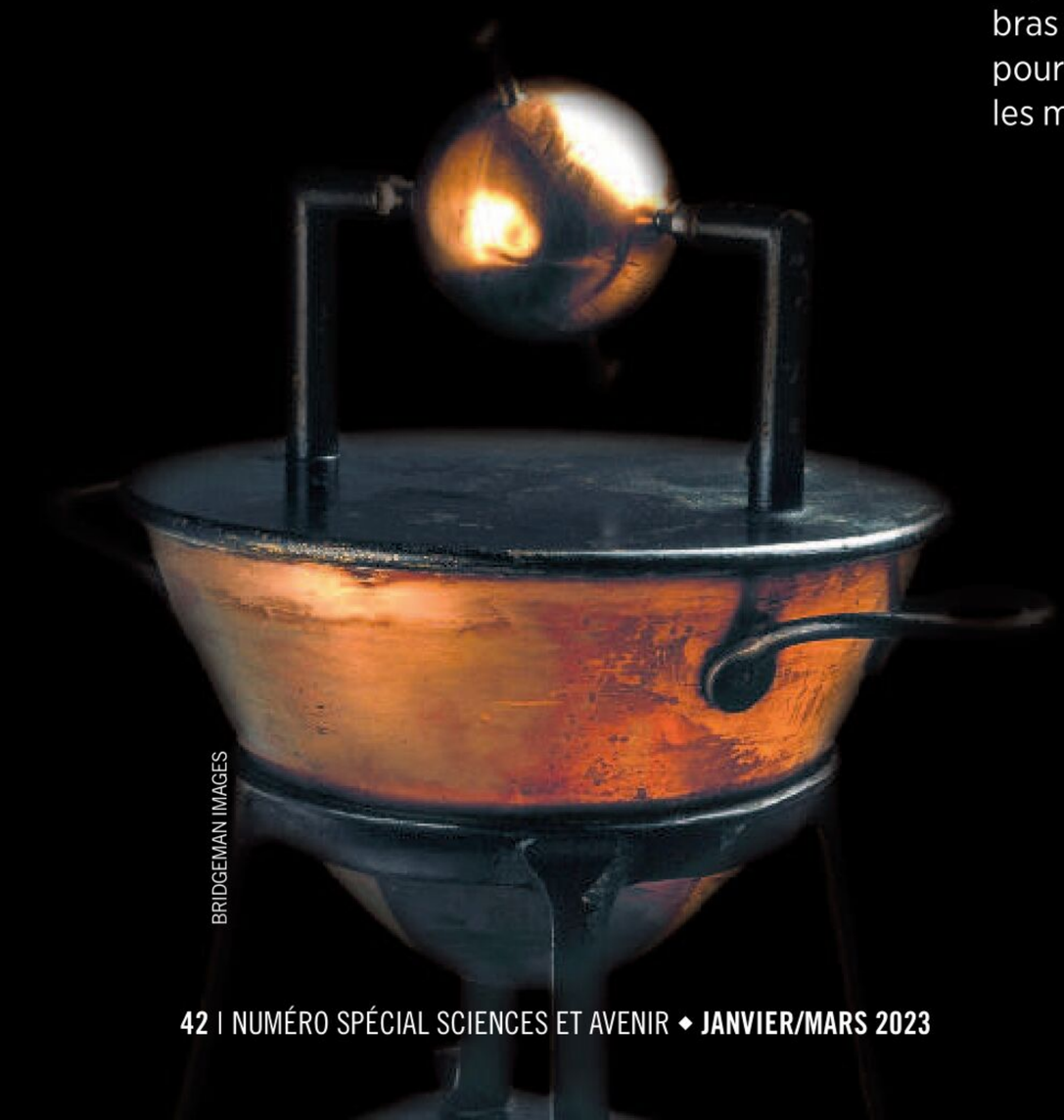
De l'ancêtre de la machine à vapeur aux détecteurs de neutrinos, ces dispositifs illustrent l'ingéniosité sans limites des savants pour comprendre la nature et ouvrir de nouveaux horizons.

L'histoire de la physique est en grande partie celle de ses instruments. Leur élaboration a constitué des bonds conceptuels autant que techniques : ils ont élargi les horizons de la pensée et permis de percer les secrets de la matière, dévoilant des réalités insoupçonnées avant leur invention. Ainsi de la lunette de Galilée qui, braquée sur le ciel, renversa la conception que l'on se faisait des corps célestes, ou du LHC, dont les scientifiques espèrent que les collisions de photons éclaireront des pans encore inconnus de la physique des particules. Ils ont aussi joué un rôle plus modeste mais constant d'auxiliaires de la recherche, aidant à trancher des controverses au long cours, à l'image de la machine pneumatique qui montra par l'expérience que la nature n'avait point horreur du vide. Ou confirmant des théories qui n'étaient au départ que des abstractions de l'esprit, telle l'existence des neutrinos. Morceaux choisis avec ce cabinet de curiosités qui raconte deux mille ans d'innovations.

MARIE-AMÉLIE CARPIO

▼ L'éolipyle

L'une des premières machines à vapeur de l'histoire remonte au Ier siècle avant notre ère. Inventé par le mathématicien grec Héron d'Alexandrie, l'éolipyle se compose d'une sphère métallique creuse montée sur deux tubes reliés à une chaudière, et pourvue de deux petits becs recourbés et diamétralement opposés. Lorsque l'eau bout, la sphère entre en rotation car la vapeur qui monte de la chaudière s'échappe par les becs.



BRIDGEMAN IMAGES

▶ L'astrolabe de Rennerus Arsenius

Réalisé au XVe siècle, cet instrument – dont le principe remonterait à l'école d'Alexandrie, au IIIe siècle av. J.-C. – permet, entre autres, de s'orienter en mesurant la hauteur d'un astre sur l'horizon. Le plateau représente une carte du ciel dont les bords sont gradués de degrés. Il est surmonté d'un second cadran métallique ajouré figurant la position des principales étoiles, et pourvu d'un bras tournant pour réaliser les mesures.

MUSÉE DES ARTS ET MÉTIERS-CNAM/PHOTO SYLVAIN PELLY

THANASSIS STAVRAKIS/AP/SIPA

◀ La machine d'Anticythère

Retrouvé en 1901 dans une épave près de l'île grecque éponyme, ce dispositif, qui daterait du IIe siècle av. J.-C., constituerait le plus ancien calculateur astronomique connu. Bien que ses vestiges soient très parcellaires – 82 fragments constitués de roues dentées, de cadrans et autres pièces en bronze – et son fonctionnement énigmatique, il témoigne d'une virtuosité technique sans équivalent pour l'Antiquité.

▶ Le sismographe de Zhang Heng

Ce savant chinois a créé le premier instrument d'enregistrement des tremblements de terre au IIe siècle. Sur une jarre de bronze, des dragons marquant huit points cardinaux abritent dans leur gueule une bille de cuivre prête à tomber dans la bouche des crapauds en dessous. Le mécanisme interne exploite le principe d'inertie : un pendule pourvu de huit bras articulés, chacun relié à un dragon, y oscille à la moindre vibration tellurique, faisant tomber la bille correspondant à la direction du séisme.

SSPL/SCIENCE MUSEUM

LES INSTRUMENTS CLÉS

MUSÉE DES ARTS ET MÉTIERS-CNAM/PHOTO PHILIPPE HURLIN

Le pendule de Foucault

Datant de 1851, le dispositif de Léon Foucault apporte la première preuve physique de la rotation de la Terre sur elle-même. Suspendue à un fil d'acier, sa sphère en plomb est pourvue d'une pointe qui effleure un lit de sable, laissant la trace de chaque oscillation. Or, alors que la trajectoire du pendule est invariable, on observe au fil du temps un décalage des marques dans le sable, qui forment un cercle en 24 heures. La sphère de Foucault est conservée au musée des Arts et Métiers, à Paris (ci-contre), où l'expérience est reconstituée deux fois par jour à l'intention des visiteurs.

▶ La lunette de Galilée

Le savant a mis au point cette lunette astronomique en 1610, perfectionnant un instrument apparu en Hollande deux ans auparavant. En quelques mois, il réalise grâce à elle des observations capitales, découvrant notamment que la surface lunaire est accidentée – ce qui contredit la conception en vigueur de corps célestes parfaits et immuables – et que la Voie lactée est constituée d'innombrables étoiles alors qu'on la tenait jusqu'alors pour une exhalaison de l'atmosphère terrestre.

ERIC VANDEVILLE/GAMMA-RAPHO

▶ La machine pneumatique de l'abbé Nollet

Cette luxueuse pompe à air conçue au XVIIIe siècle permet de créer le vide lorsqu'on aspire l'air contenu dans sa cloche de verre. On découvrit grâce à elle les propriétés de l'air, nécessaire notamment à la respiration – ce que l'asphyxie de petits animaux placés dans la cloche montrait de façon spectaculaire. Ils expiraient lorsque le vide était fait. L'abbé Nollet se servit de l'instrument pour ses leçons de physique expérimentale à destination de la bonne société.

MUSÉE DES ARTS ET MÉTIERS-CNAM/PHOTO M. FAVAREILLE

MUSÉE DES ARTS ET MÉTIERS-CNAM/PHOTO M. FAVAREILLE

▲ La bouteille de Leyde

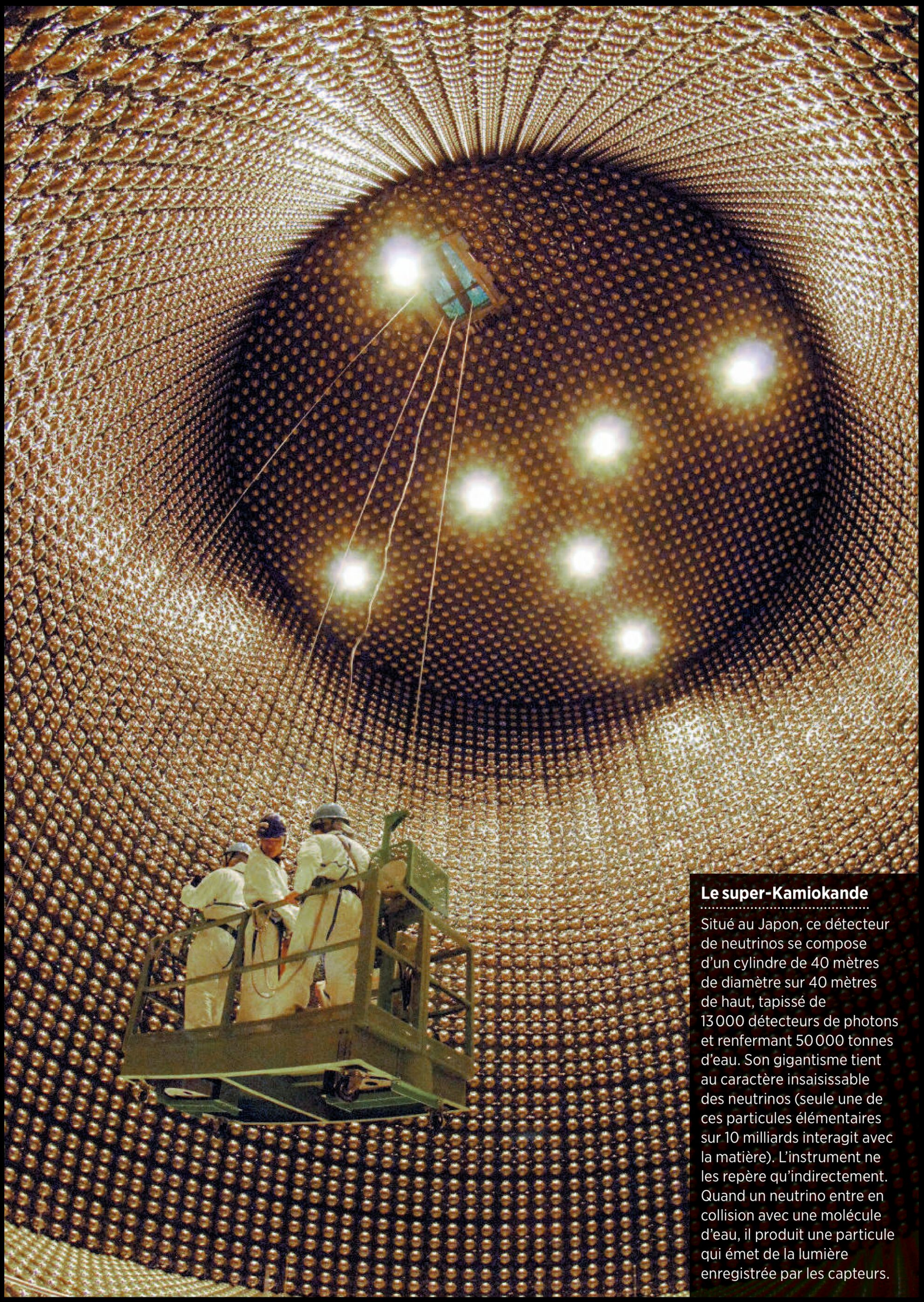
Créée à Leyde, aux Pays-Bas, en 1745, cette bouteille montre la propagation de l'électricité statique. Elle alterne deux couches de matériaux conducteurs (tige et copeaux métalliques dans la fiole, feuilles d'étain ou d'or sur sa face externe) séparées par un isolant (verre). La bouteille se charge lorsque la tige est en contact avec une machine électrostatique ; elle se décharge quand on tient d'une main ce crochet, et de l'autre la face externe de la bouteille, la secousse qui traverse alors la personne matérialisant l'électricité.

MUSÉE DES ARTS ET MÉTIERS-CNAM

◀ La machine à calculer de Pascal

C'est pour simplifier le travail de son père, commissaire du roi à la levée des impôts, que Blaise Pascal élabore les premières machines à calculer de l'histoire. Déclinées en plusieurs modèles, dont celui-ci datant de 1645, ces « pascalines » permettent d'additionner ou de soustraire des nombres en effectuant automatiquement la retenue grâce à un système mécanique.

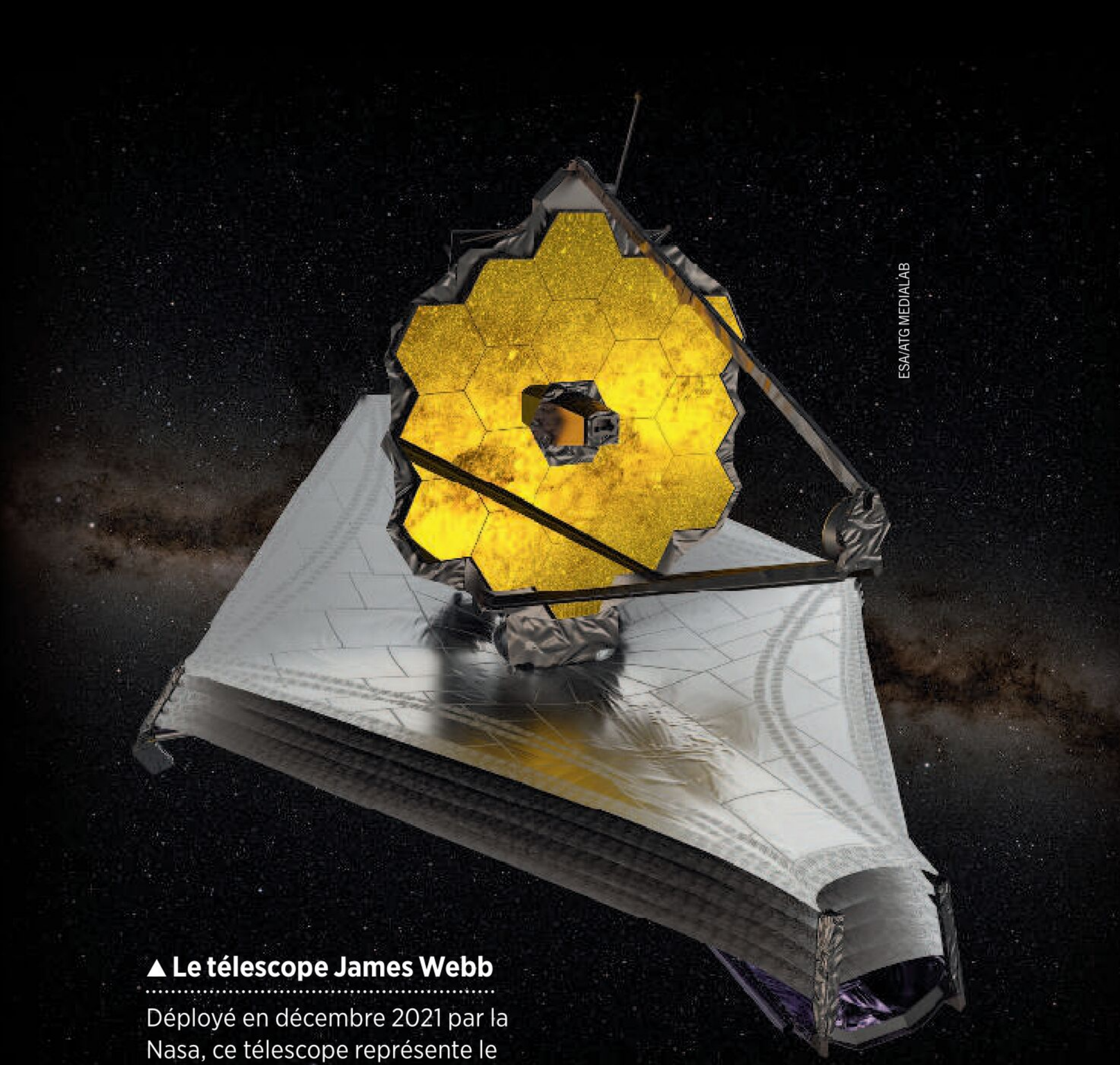
LES INSTRUMENTS CLÉS



THE ASAHI SHIMBUN / GETTY IMAGES

Le super-Kamiokande

Situé au Japon, ce détecteur de neutrinos se compose d'un cylindre de 40 mètres de diamètre sur 40 mètres de haut, tapissé de 13 000 détecteurs de photons et renfermant 50 000 tonnes d'eau. Son gigantisme tient au caractère insaisissable des neutrinos (seule une de ces particules élémentaires sur 10 milliards interagit avec la matière). L'instrument ne les repère qu'indirectement. Quand un neutrino entre en collision avec une molécule d'eau, il produit une particule qui émet de la lumière enregistrée par les capteurs.



ESA/ATG MEDIALAB

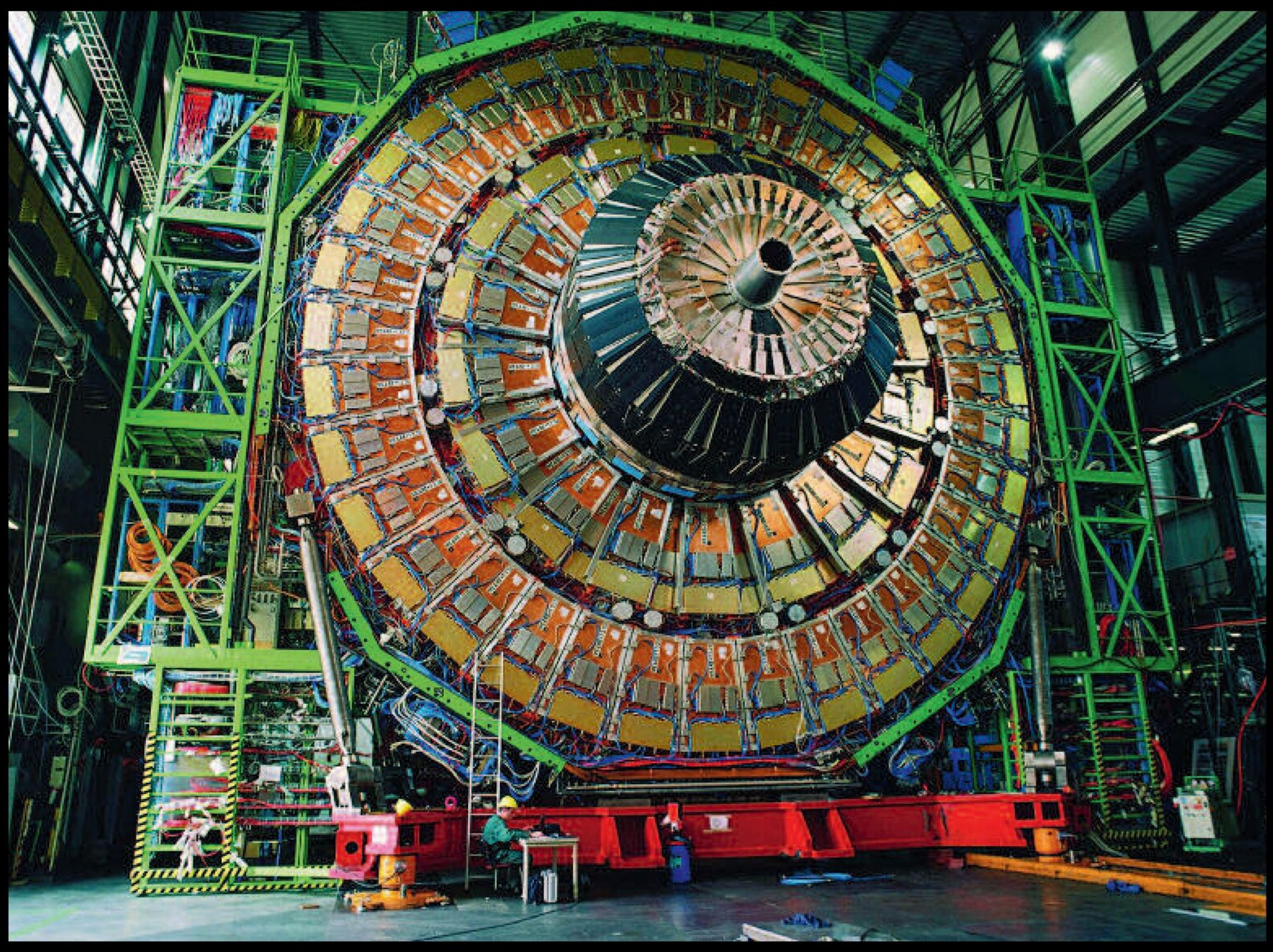
▲ Le télescope James Webb

Déployé en décembre 2021 par la Nasa, ce télescope représente le plus grand observatoire en orbite. Il tourne aujourd'hui autour du Soleil à 1,5 million de kilomètres de la Terre. Par comparaison, le télescope Hubble orbite à moins de 600 kilomètres d'altitude autour de notre planète. Avec son miroir de 6,5 mètres de diamètre et ses détecteurs de rayonnement infrarouge proche et moyen, il a été conçu pour scruter les galaxies très lointaines de l'Univers ainsi que les gaz et les poussières interstellaires, avec une sensibilité inédite.

NASA/JPL-CALTECH/MSSS

▲ Le robot Curiosity

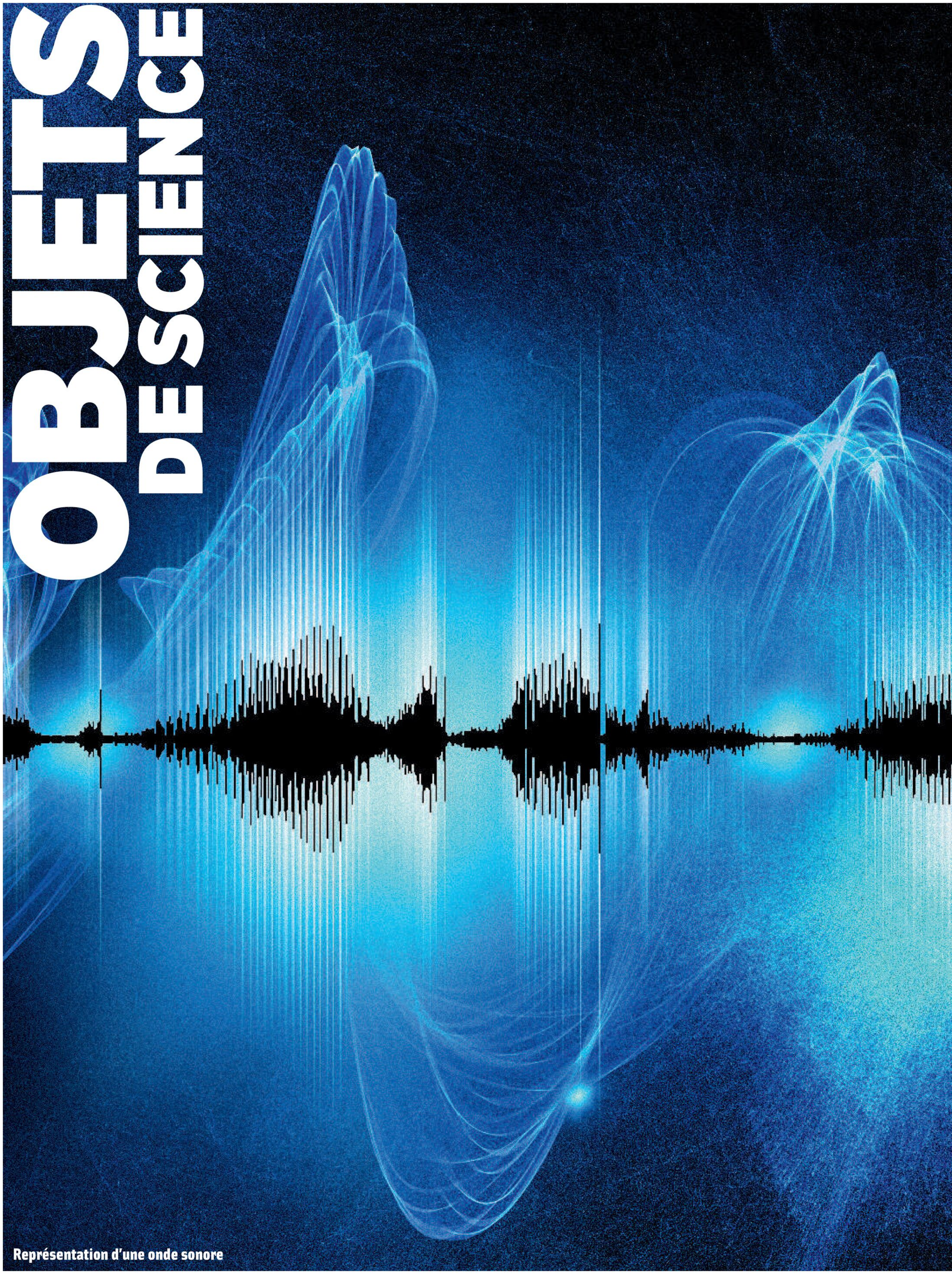
Ce rover d'exploration a atterri sur Mars il y a dix ans. Son objectif : étudier l'environnement de la planète rouge grâce à toute une batterie d'instruments, dont plusieurs spectromètres chargés d'identifier les matières organiques et les minéraux présents dans la roche, un détecteur de radiations et un détecteur de neutrons destiné à repérer la présence d'eau souterraine. Les données récoltées par le robot ont notamment permis de découvrir que Mars avait été habitable il y a 4 milliards d'années.



REX FEATURES/REX/SIPA

◀ Le LHC

Occupant un tunnel de 27 kilomètres de circonférence sous la frontière franco-suisse, le grand collisionneur de hadrons (LHC) réalisé par le Cern, l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire, est le plus puissant accélérateur de particules du monde. On y fait se collisionner des faisceaux de particules à une vitesse proche de celle de la lumière. En 2012, le LHC a permis de découvrir le boson de Higgs, impliqué dans le processus donnant leur masse aux particules. Il pourrait à l'avenir apporter des éléments cruciaux sur la nature de la matière noire ou le destin de l'antimatière.



KULYK MEHAU /SCIENCE PHOTO LIBRARY / SUCRÉ SALÉ

Représentation d'une onde sonore

Pourquoi le Soleil est-il chaud ? La Terre est-elle infinie ? Peut-on rejoindre les étoiles ? Comment entendre la voix des absents ? Autant de questions que tout un chacun se pose un jour… et que les physiciens, eux, s'acharnent à résoudre, parfois au péril de leur vie ! Pourtant, les réponses, de plus en plus précises, ne satisfont jamais leur soif de connaissance.

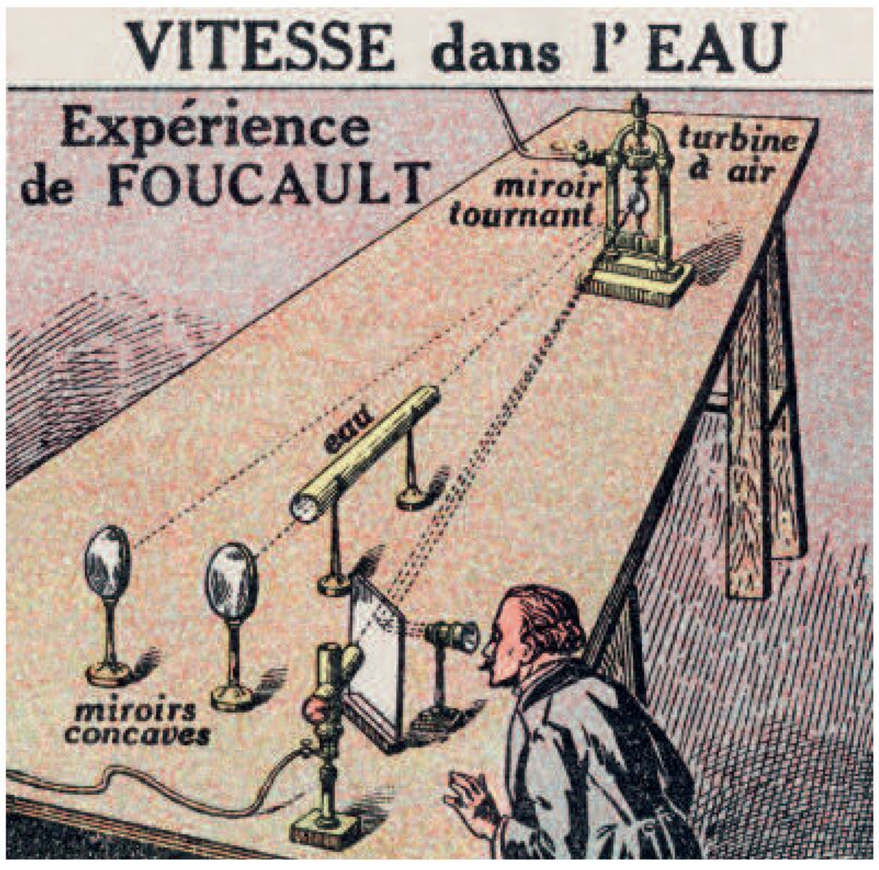
L'épopée du photon ou la nature double de la lumière

Onde ou corpuscule, telle a longtemps été la question. La réponse appartient à la physique quantique et aux photons, dont le surprenant comportement appelle toujours de nouvelles questions…

Aujourd'hui, les chercheurs du laboratoire Kastler-Brossel du Collège de France, tel le prix Nobel de physique 2012 Serge Haroche, vivent en pleine lumière… sauf quand ils font des expériences. Les lasers, lentilles et miroirs sont si sensibles que toute lumière parasite viendrait fausser les mesures. Et pourtant, c'est bien la lumière qui intéresse ces scientifiques, qui poursuivent ici une quête vieille de plus de 2 500 ans.

« *Dans* l'Odyssée*, Homère écrit qu'Agamemnon lance des éclairs avec ses yeux* », cite le physicien. Pour le poète grec, ce serait donc l'œil qui émet de la lumière, et non les objets ! Près de deux millénaires plus tard, au tournant de l'an mil, le savant arabo-persan Abu Ali ibn Hasan – connu en Occident sous le nom d'Alhazen – montre que la lumière parvient au fond de l'œil comme elle le fait au fond d'une chambre noire. Ainsi, ce sont les objets qui émettent de la lumière, et nous la captons soit par notre système de vision, soit par des instruments adéquats.

En Occident, le sujet de la lumière n'est repris qu'au XVII[e] siècle. René Descartes édicte en 1637 des lois mathématiques sur la réfraction. Vingt ans plus tard, le mathématicien français Pierre de Fermat énonce que la lumière va d'un point à un autre en suivant la trajectoire qui minimise son temps de parcours. Et en Italie, Galilée tente de mesurer sa vitesse sur quelques kilomètres, sans y parvenir. Se pourrait-il qu'elle soit instantanée ?



ADOC-PHOTOS

En 1850, Léon Foucault utilise des miroirs tournants pour mesurer la vitesse de la lumière à travers différents milieux.

Il reviendra à Olaus Römer, astronome danois à l'Observatoire de Paris, de trancher, en 1676. Observant les éclipses du satellite Io de Jupiter qui, en sortant de l'ombre de la planète, réapparaît en avance ou en retard par rapport à ce que prédisent les lois de Kepler, il montre que ce décalage est dû à la distance que la Terre parcourt pendant que Io tourne autour de la géante gazeuse. Selon que notre planète se rapproche ou s'éloigne de celle-ci, la lumière provenant de Io nous arrive soit en avance, soit en retard. La lumière se propage donc avec une vitesse finie ! Römer l'évalue grossièrement grâce aux horloges à pendule inventées vingt ans plus tôt par l'astronome hollandais Christiaan Huygens. Hippolyte Fizeau en 1849 avec une roue dentée, puis Léon Foucault en 1850 avec des miroirs tournants, et enfin Albert Michelson et Edward Morley en 1878 donneront de cette vitesse des mesures de plus en plus précises.

Mais un autre débat s'engage : quelle est la nature de la lumière ? « *Il va durer presque trois siècles* », rappelle Serge Haroche. Il débute en 1671 lorsque Newton, dans son traité sur les couleurs, énonce que la lumière est faite de corpuscules colorés. Vingt ans plus tard, Huygens la voit comme une onde, telles celles qui se propagent sur l'eau quand on y lance un caillou, et prétend qu'elle va moins vite dans l'eau que dans l'air. Au contraire de Newton… Vu l'aura dont l'Anglais bénéficie à l'époque, c'est sa vision qui prédomine pendant tout le XVIII[e] siècle.

Changement de situation en 1801, quand l'Anglais Thomas Young, suivi, en 1818, par le Français Augustin Fresnel, observe ce que produit la lumière lorsqu'on la fait passer par deux fentes parallèles : des interférences, comme

« POUR EINSTEIN, L'ÉNERGIE LUMINEUSE EST QUANTIFIÉE EN GRAINS DISCRETS, LES FUTURS PHOTONS. SON HYPOTHÈSE RANIME LE DÉBAT ONDE-CORPUSCULE QU'ON PENSAIT CLOS »

Serge Haroche, physicien, lauréat du prix Nobel de physique 2012

SPL/SUCRÉ SALÉ

quand deux ondes interagissent. Tous deux se rangent à la conclusion de Huygens sur la nature ondulatoire de la lumière.

Comment la mécanique quantique s'impose à Einstein

Une onde, d'accord, mais de quelle nature ? En 1865, James Maxwell montre que les champs électrique et magnétique se propagent à la vitesse que Foucault vient de mesurer pour la lumière. Il ne peut s'agir d'une coïncidence : la lumière est une onde électromagnétique. Maxwell prédit qu'il en existe de toutes longueurs d'ondes, mais que seules sont visibles celles comprises dans une étroite fenêtre entre l'infrarouge et l'ultraviolet. À la fin du XIXe siècle, l'Allemand Heinrich Hertz met en évidence celles de très grandes longueurs, les ondes radio. Du côté des très courtes, un autre Allemand, Wilhelm Röntgen, découvre par hasard les rayons X et le Français Paul Villard des rayons encore plus « pénétrants », les rayons gamma. *« Cela a ouvert la voie à toutes sortes d'applications*, s'enthousiasme Serge Haroche. *L'exploration du corps humain par les rayons X et les télécommunications par ondes radio doivent leur essor à la reconnaissance que la lumière est une onde électromagnétique. »*

Ainsi, à la fin du XIXe siècle, l'affaire semble entendue : la lumière est formée d'ondes électromagnétiques. *« En 1900, le physicien britannique Lord Kelvin explique que l'on a compris beaucoup de choses en physique, mais qu'il existe deux nuages noirs remettant en cause les concepts »*, rappelait en 2015, dans une conférence, Alain Aspect *(lire aussi p. 26-31)*. Le premier a trait à la répartition de l'énergie d'un système thermodynamique à l'équilibre, et concerne notamment ce qu'on appelle le rayonnement du corps noir. *« Dans l'industrie, on a l'habitude de mesurer précisément le rayonnement thermique d'un four en fonction de la température. Comme il n'est pas question d'y mettre un thermomètre, on observe la lumière rayonnée par le four et on déduit la température par les propriétés spectrales du rayonnement »*, explique Serge Haroche. Or, la courbe spectrale de ce rayonnement n'est pas explicable par la thermodynamique classique et les équations que Maxwell a élaborées pour l'électromagnétisme : selon ces théories, l'énergie rayonnée peut, dans certaines conditions, être… infinie ! Au tournant du siècle, l'Allemand Max Planck parviendra à une solution déconcertante : il assurera que les échanges d'énergie entre les atomes de la paroi du four et la lumière ne peuvent se faire que par sauts, par quantités discrètes, c'est-à-dire bien définies. *« Einstein ne s'est pas contenté de ce résultat*, poursuit Serge Haroche. *Pour lui, l'énergie lumineuse elle-même est quantifiée en grains discrets, baptisés photons en 1926 par l'Américain Gilbert Lewis. Son hypothèse a remis sur le tapis le débat onde-corpuscule. »*

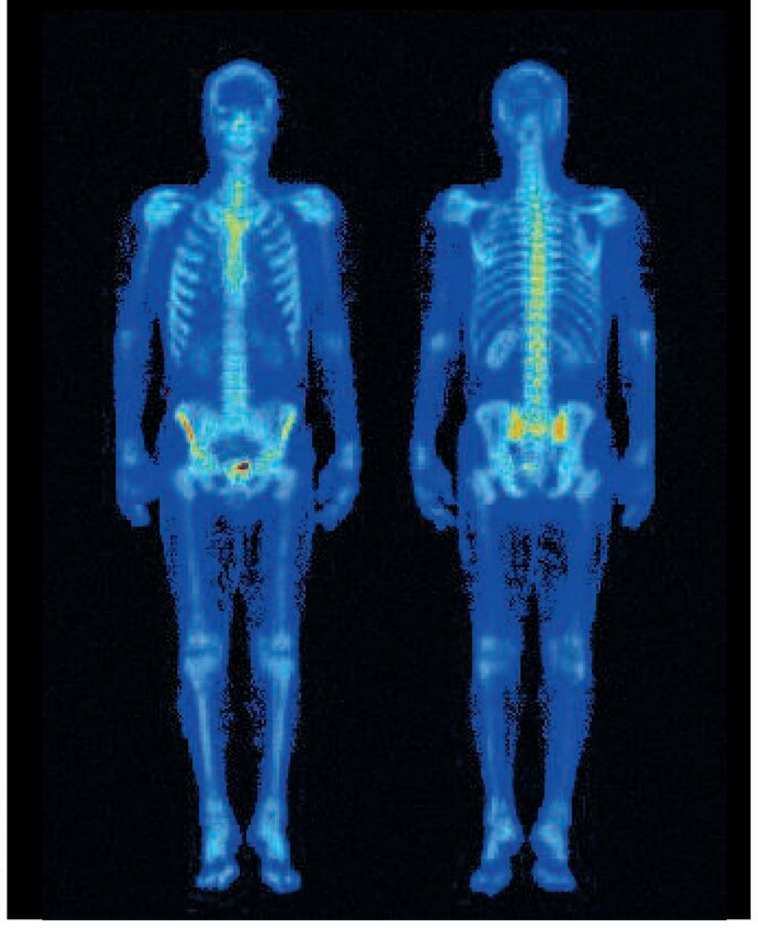
Le deuxième nuage noir évoqué par Lord Kelvin concernait la vitesse de la lumière. Une fois encore, Einstein révolutionnera la physique. Il s'apercevra que dans les équations décrivant les fluctuations de la lumière émergent deux groupes de termes, l'un de nature ondulatoire, l'autre de nature corpusculaire. Il émettra alors l'idée que la lumière n'est ni seulement une onde, ni seulement formée de corpuscules, mais… les deux à la fois ! Les années suivantes verront la construction théorique de la physique quantique. La nouvelle discipline permettra l'émergence des lasers et leurs applications pratiques, comme l'inter- ◆◆◆

L'expérience des fentes, réalisée en 1801, a permis au physicien anglais Thomas Young d'affirmer le caractère ondulatoire de la lumière en observant les interférences formées sur un écran par une lumière passant à travers deux fentes. Une partie seulement de sa double nature… Depuis, la manipulation a été réitérée avec des particules telles que des électrons, prouvant, là encore, leur caractère ondulatoire.

Serge Haroche, *La Lumière révélée*, Odile Jacob, 2020

Conférence d'Alain Aspect à l'Institut d'astrophysique de Paris en novembre 2015, sciav.fr/photon

SPL/SUCRÉ SALÉ



SPL/SUCRÉ SALÉ

◆◆◆ net par fibre optique. *« Ainsi, les deux révolutions de la physique moderne que sont la relativité et la mécanique quantique viennent des interrogations profondes sur la nature de la lumière »*, signale Serge Haroche.

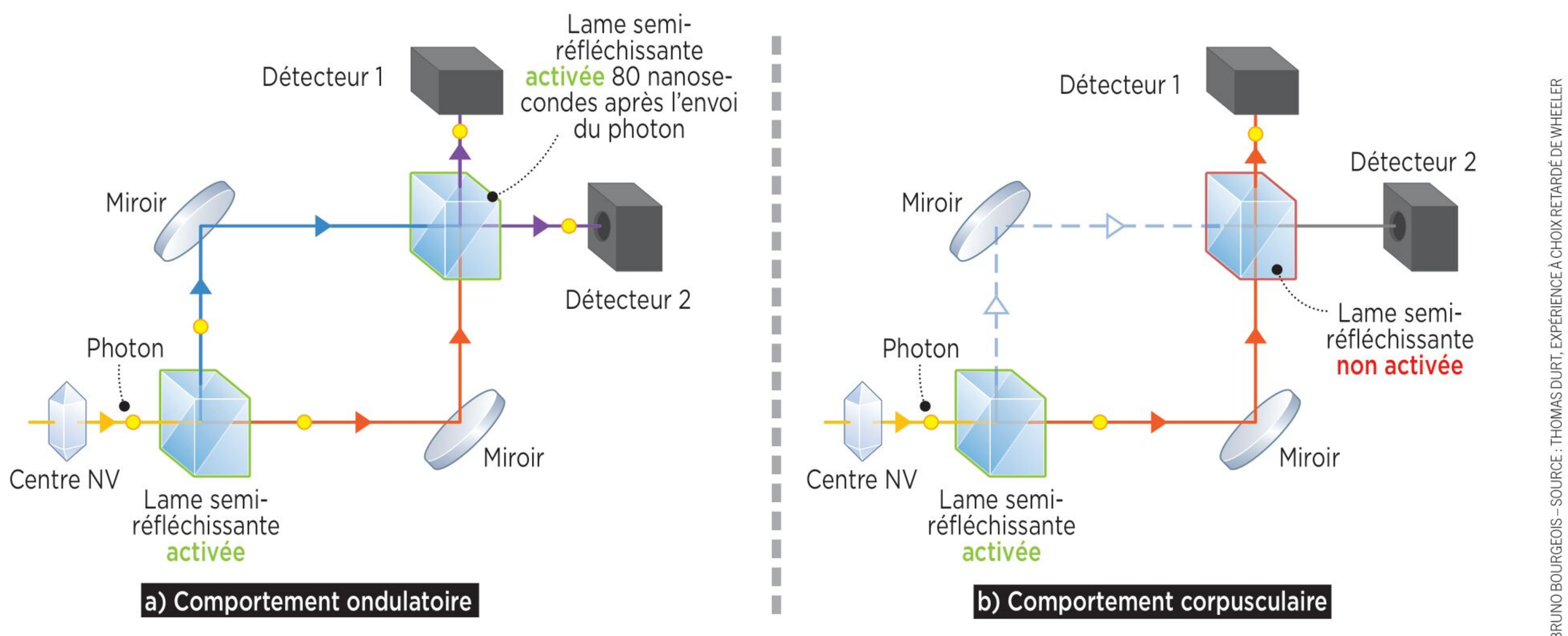
L'étude de la lumière soumise à la précision du temps

Mais pourquoi la lumière se comporte-t-elle tantôt comme une onde, tantôt comme un ensemble de corpuscules ? C'est une question d'expérience… En mécanique quantique, aucune particule n'est en effet localisée jusqu'à ce qu'un dispositif expérimental détermine sa position et son comportement. Par exemple, dans l'expérience de Young, les particules se comportent comme des ondes qui se renforcent ou se contrecarrent tant qu'on ne cherche pas à savoir quel chemin elles suivent. Mais dès qu'on inclut, dans le dispositif expérimental, un appareil capable de mesurer la position des particules, celles-ci suivent un chemin déterminé… et les interférences disparaissent.

Mais pour rendre ces expériences vraiment concluantes, encore faut-il n'envoyer dans l'appareil qu'une seule particule à la fois. Un éclairage habituel fournit en gros 10^{20} photons par seconde, et ne permet de voir que la nature ondulatoire de la lumière. En 1985, Philippe Grangier, élève d'Alain Aspect, aujourd'hui directeur de recherche à l'Institut d'optique à l'université de Paris-Saclay, a réalisé une expérience démontrant la possibilité d'émettre des photons « un par un ». Puis ces photons individuels ont été envoyés dans un interféromètre très stable. Des franges d'interférences ont été observées, alors qu'elles ne devraient apparaître qu'avec au moins deux sources lumineuses ! Cette expérience, publiée en 1986, est considérée comme une mise en évidence particulièrement directe de la dualité onde-corpuscule.

Plus récemment (2005), une autre manip', dirigée par Vincent Jacques et Jean-François Roch, a été réalisée par une équipe de l'École normale supérieure de Cachan (maintenant École normale supérieure de Paris-Saclay). Les chercheurs ont d'abord mis au point une nouvelle source de photons uniques : les centres colorés d'un diamant. *« Le diamant est un cristal de*

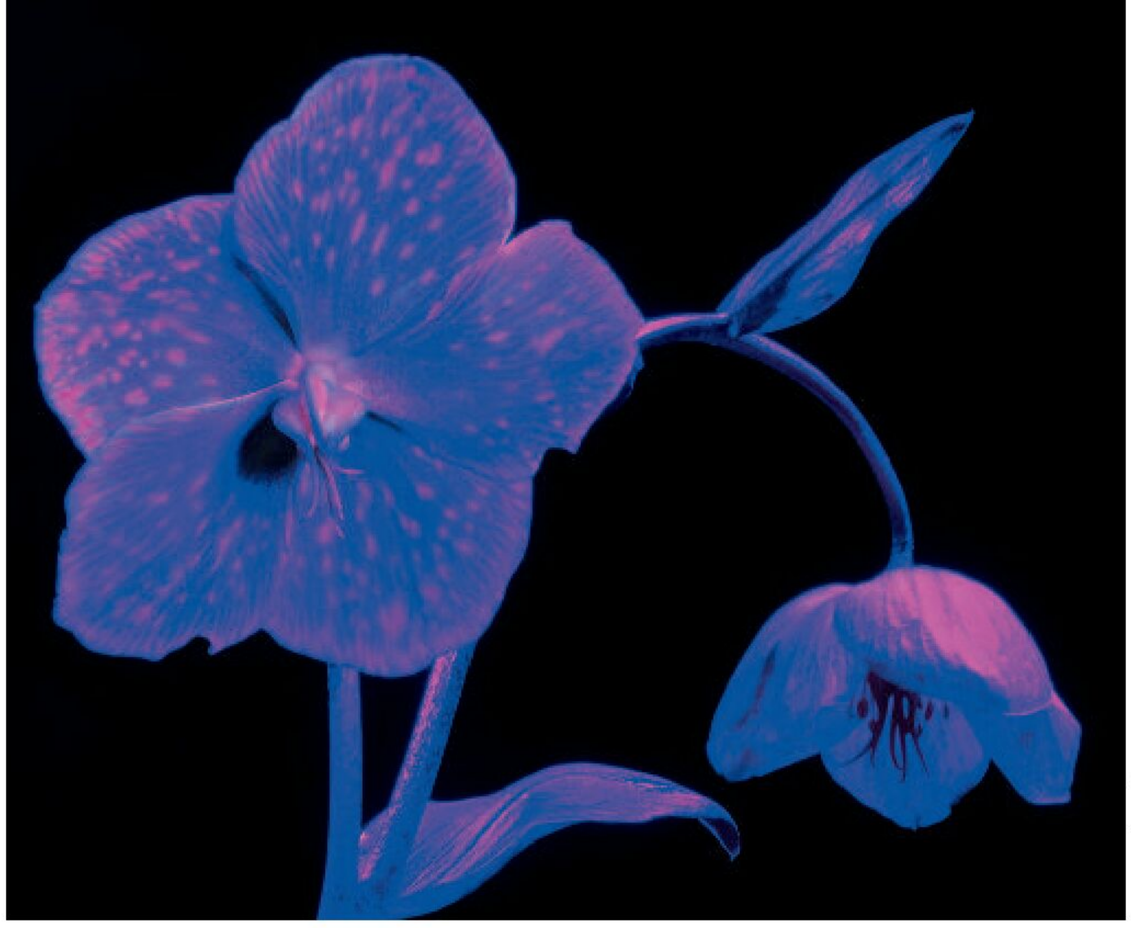
Quand le photon ne sait pas ce qui l'attend…



BRUNO BOURGEOIS – SOURCE : THOMAS DURT, EXPÉRIENCE À CHOIX RETARDÉ DE WHEELER

Dans l'expérience à choix retardé, une lame est activée, ou non, dans un interféromètre alors que le photon est déjà en cours de route. Toutes les 238 nanosecondes (ns), un photon unique est produit par un centre NV et envoyé à travers une lame semi-réfléchissante qui le sépare en deux (flèches bleues et rouges en a, blanches et rouges en b). 80 ns après l'envoi du photon, une deuxième lame semi-réfléchissante est activée (a) ou non (b). Lorsqu'elle est activée, le photon prend (avant cette deuxième lame) les deux directions. Puis les deux chemins se recombinent, on observe des interférences sur les deux détecteurs D1 et D2, qui détectent le photon comme une onde. Lorsque la lame est inerte (b), le photon suit une seule route vers un seul détecteur, et est détecté comme un corpuscule.

SPL/SUCRÉ SALÉ



SPL/SUCRÉ SALÉ

Illustration de l'étendue du spectre électromagnétique. L'utilisation de rayonnements différents (de gauche à droite : rayons X, gamma, infrarouge et ultraviolet) permet d'étendre notre connaissance du visible : voir des tumeurs des os sur un squelette grâce aux rayons gamma, par exemple, ou les motifs que les insectes perçoivent en UV sur une fleur.

carbone qui comporte parfois des lacunes associées à un atome d'azote, appelées "centres NV", explique Philippe Grangier. *Lorsqu'on excite un de ces centres, il émet "à la demande" un seul et unique photon.* » L'objectif de cette expérience, appelée « choix retardé », était de « surprendre le photon ». Le principe : envoyer un photon unique sur une lame semi-réfléchissante créant deux faisceaux perpendiculaires, en attendant qu'il soit entré dans l'appareil de mesure pour décider de le surprendre sur un détecteur (et mettre ainsi en évidence une propriété corpusculaire), ou de recombiner les deux faisceaux sur une seconde lame afin d'observer des interférences (et mettre ainsi en évidence une propriété ondulatoire). Le résultat de l'expérience a été clair : le photon… ne se laisse pas surprendre. Son comportement est dicté par l'appareil de mesure.

Ces expériences sur la lumière expliquent-elles aussi la nature de la matière ? « *On comprend grâce à la physique quantique comment la nature fonctionne au niveau microscopique, qu'il s'agisse de photons ou de particules matérielles*, atteste Serge Haroche. *Le côté contre-intuitif de cette physique fait que certains ont cherché à y voir quelque chose de mystérieux, voire de mystique. Mais elle ne témoigne d'aucun "dessein intelligent" ni d'une finalité cachée.* » La suite des études sur la lumière passera par une meilleure précision des mesures du temps. Le pendule de Huygens était exact à quelques secondes près par jour, le GPS à 10^{-14} seconde près/jour. On parvient aujourd'hui à 10^{-19} seconde grâce à des horloges mesurant les fréquences de résonance très élevées d'atomes, assez précises pour être sensibles à la différence du rythme d'écoulement du temps entre deux points dont l'altitude ne diffère que d'un millimètre !

C'est aussi grâce à la lumière qu'une nouvelle voie s'offre pour connaître l'Univers, celle des ondes gravitationnelles émises lors de la fusion de deux trous noirs ou d'autres objets stellaires hyperdenses. Les chercheurs peuvent en effet mesurer l'effet de ces ondes sur une lumière laser circulant entre des miroirs distants de plusieurs kilomètres. Résultat : le dispositif se déplace d'un millionième de milliardième de millimètre sur quatre kilomètres, soit un effet relatif de 10^{-22}. On n'a pas encore fait mieux.

JACQUES-OLIVIER BARUCH

« LE CÔTÉ CONTRE-INTUITIF DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE FAIT QUE CERTAINS ONT CHERCHÉ À Y VOIR QUELQUE CHOSE DE MYSTÉRIEUX, VOIRE DE MYSTIQUE »

Serge Haroche

LA PHYSIQUE DANS 30 ANS…

CHRISTOPHE ARCHAMBAULT/AFP

Serge Haroche, prix Nobel de physique 2012

En 2050, il y aura certainement des applications des nouvelles technologies quantiques différentes de celles qu'on envisage aujourd'hui, notamment dans les domaines des mesures de haute précision ou de la communication. Et sur le plan fondamental, j'espère que va émerger une théorie de la gravitation quantique et que l'on saura résoudre les grands problèmes de la cosmologie : qu'est-ce que la matière noire, qui joue un rôle gravitationnel sans interagir avec la lumière ? Quelle est la nature de l'énergie noire ? Que se passe-t-il au cœur d'un trou noir ? La difficulté est de pouvoir confronter aux expériences ce que nous diront les recherches théoriques. Question instruments, si l'on veut créer des particules de masse ou d'énergie beaucoup plus grande que ce qu'on sait faire aujourd'hui, il nous faudrait des machines gigantesques, impossibles à construire. En revanche, en faisant des mesures suffisamment précises et sensibles – en particulier grâce aux méthodes que nous promettent les nouvelles technologies quantiques –, on pourra observer des effets subtils produits par la création et l'annihilation virtuelle de particules impossibles à produire dans un accélérateur, et ainsi peut-être obtenir indirectement des informations importantes sur la physique au-delà du modèle standard actuel. On est sans doute proche de la limite de la « big science » en physique des particules, avec une recherche plus axée sur l'augmentation de la précision des mesures que des énergies mises en jeu. Celle-ci a cependant encore de beaux jours devant elle en astrophysique, avec les grands télescopes actuellement en construction.

Les **pionniers du son** et leurs drôles de machines

En 1857, vingt ans avant le phonographe d'Edison, un Français, Édouard-Léon Scott de Martinville, invente le premier procédé de transcription du son… dont on n'a pu écouter que récemment l'étonnant résultat.

De nombreux savants se sont intéressés aux phénomènes sonores: au XVII^e siècle, Galilée commence à décrire l'onde acoustique comme un mouvement de l'air créé par un objet vibrant, et le physicien français Marin Mersenne réalise des mesures de propagation; au XVIII^e siècle, les mathématiciens transforment l'onde acoustique en équations… Ce ne sont pourtant pas des théoriciens, mais des ingénieurs et des inventeurs qui, à partir du milieu du XIX^e siècle en Europe et aux États-Unis, auront l'idée d'enregistrer le son. *« Des amateurs et des curieux, parfois des hurluberlus! »*, sourit Patrick Flandrin, physicien et président de l'Académie des sciences, cherchant à capter ce qui est fugitif et ne laisse pas de trace.

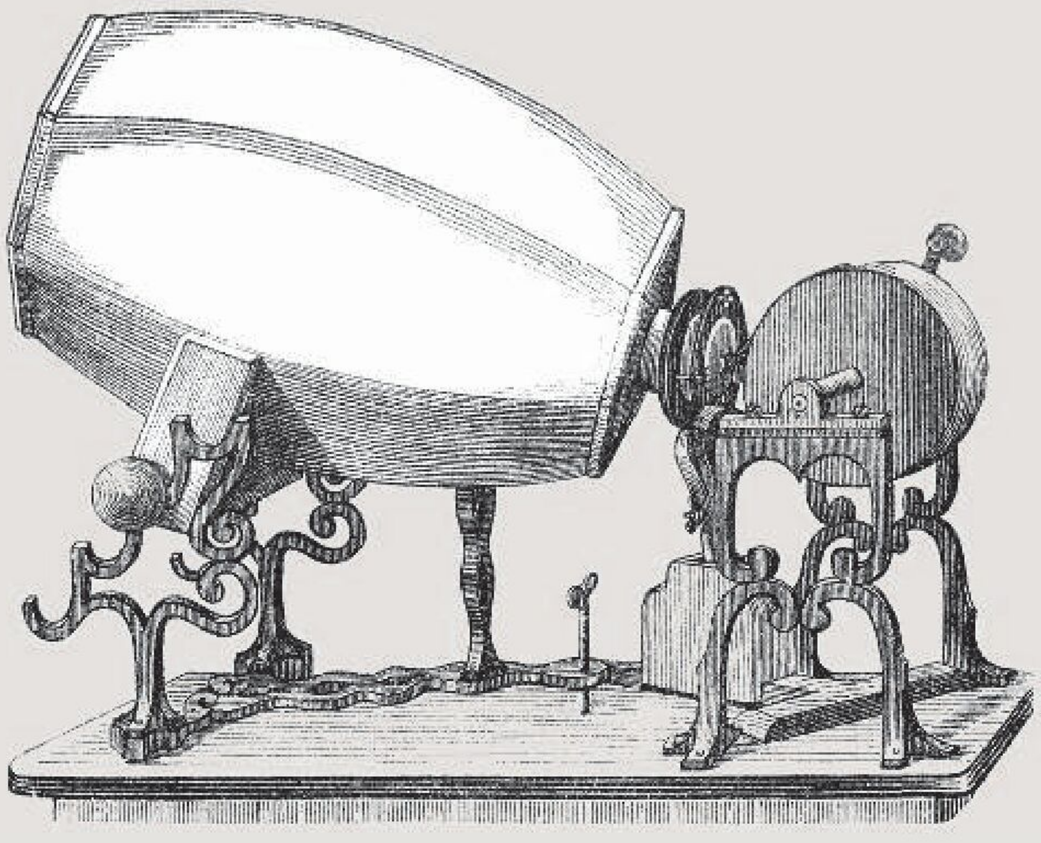
On pense à Edison, mais le premier à y parvenir est un typographe français touche-à-tout: Édouard-Léon Scott de Martinville. Épaulé par le fabricant d'instruments de laboratoire Rudolph Koenig, cet autodidacte invente le phonautographe – *« la parole s'écrivant elle-même »*, selon ses propres mots – pour lequel il dépose un brevet en 1857. Son fonctionnement est similaire à celui d'un sismomètre actuel: lors d'un tremblement de terre, une aiguille tressaute, laissant une trace d'encre sur du papier qui défile. Le phonautographe capte, lui, les paroles au moyen d'un grand cornet terminé par une membrane à laquelle est relié un stylet très léger. Tel le tympan de l'oreille, la membrane vibre sous l'effet des ondes sonores et transmet ses mouvements au stylet, qui trace alors une ligne sur une feuille positionnée sur un cylindre en rotation et recouverte de noir de fumée. Avec ce procédé, Scott de Martinville transforme donc l'onde acoustique en un tracé blanc sur un papier noirci, première représentation physique du son.

Phono Museum
Paris, 53, boulevard de Rochechouart, 75009 Paris
www.phonomuseum.fr

First Sounds Initiatives
sciav.fr/premiers-sons

L'homme qui chuchotait à l'oreille des chercheurs…

Pendant cent vingt ans, on a cru que Thomas Edison avait été le premier à enregistrer la voix humaine. Mais en 2008, coup de tonnerre: l'association First Sounds révèle qu'elle a réussi à faire renaître un phonautogramme d'Édouard-Léon Scott de Martinville datant du 9 avril 1860. Pour y parvenir, elle a fait appel à deux chercheurs de l'université californienne de Berkeley, qui ont conçu un procédé de lecture laser des disques anciens. Dans le cas très spécial des phonautogrammes, ceux-ci ont été scannés à très haute résolution et les marques transformées en une onde sonore par un algorithme. Résultat: quatorze secondes, à la vitesse supposée de l'enregistrement, d'*Au clair de la Lune* chantées par Édouard-Léon Scott de Martinville, mais qu'il n'aura jamais entendues. Depuis 2015, *« les premiers enregistrements de la voix de l'humanité: les phonautogrammes d'Édouard-Léon Scott de Martinville (1853-1860) »* sont inscrits au registre de la Mémoire du monde de l'Unesco.



THE GRANGER COLLECTION/COLL. CHRISTOPHEL

Le phonautographe n'enregistre pas le son. Il traduit ses vibrations par une ligne tracée sur un papier noirci.

SPL/SUCRÉ SALÉ

Son invention passera toutefois inaperçue jusqu'en… 2008. Cette année-là, un enregistrement d'*Au clair de la lune* qu'il a réalisé en 1860 – soit dix-sept ans avant l'invention du phonographe – a pu être traduit en sons grâce à la technologie du XXIe siècle *(lire l'encadré)*. *« Le phonautographe ne permet pas de reproduire le son enregistré,* souligne Patrick Flandrin. *Cela n'intéressait pas Martinville, qui avait une vision romantique de son invention : plus qu'une représentation physique du son lui-même, il espérait que la trace ainsi engendrée puisse garder en mémoire les émotions de la voix. »* Cela expliquerait son engouement pour l'enregistrement d'airs d'opéra ou de scènes de théâtre.

Un autre Français restera lui aussi dans l'ombre de Thomas Edison. Inspiré par la photographie en plein développement, le savant et poète Charles Cros *« voulait conserver et restituer les paroles d'un proche après son décès »*, raconte l'historien des sciences François Baskevitch. Au printemps 1877, il rédige un document dans lequel il décrit un *« procédé d'enregistrement et de reproduction des phénomènes perçus par l'ouïe »*. Son paléophone repose exactement sur la même technologie que le phonographe d'Edison ; l'Américain déposera de justesse un brevet avant le poète.

Le gramophone, commercialisé à partir de 1894, permet de lire de la musique gravée non plus sur des cylindres (phonographe) mais sur des disques de gomme-laque. Ici, un 78-tours.

Dans les années 1960, le succès du mange-disque

Dans la saga des enregistrements sonores, seul Thomas Edison sera donc passé à la postérité. Les oscillations de l'onde acoustique ne sont plus simplement dessinées sur du papier, mais gravées sur des rouleaux entourés d'une feuille d'abord d'étain, puis de cire. Cette différence permet d'inverser le fonctionnement de l'instrument. *« Lorsque Edison invente le phonographe,* poursuit François Baskevitch, *c'est dans le but d'améliorer l'usage du téléphone qui, à cette époque, ne permet pas de communiquer à plus de cinq kilomètres. Son idée est de l'utiliser comme une sorte de répondeur-enregistreur capable de relayer la conversation. »* Le principe ? On fait tourner manuellement le cylindre, et le stylet, le même que celui utilisé pour l'enregistrement, suit le sillon gravé. Ces mouvements sont transmis à la membrane qui les transforme en vibrations sonores.

Pendant des décennies, les innovations s'appuieront sur les travaux d'Edison. Par exemple, le gramophone d'Emile Berliner, Allemand naturalisé américain, fonctionne avec des disques plats, lesquels améliorent l'enregistrement, peuvent être reproduits en série et stockés bien plus facilement que les cylindres des phonographes. *« Ainsi des vinyles lus sur les mange-disque des années 1960, qu'on emportait à la plage »*, note Patrick Flandrin. Et qui connaissent aujourd'hui un retour en grâce chez nombre de mélomanes.

MARINE CYGLER

S. CASSANAS

« PLUS QU'UNE REPRÉSENTATION PHYSIQUE DU SON, SCOTT DE MARTINVILLE ESPÉRAIT QUE LA TRACE ENGENDRÉE PUISSE GARDER EN MÉMOIRE LES ÉMOTIONS DE LA VOIX »

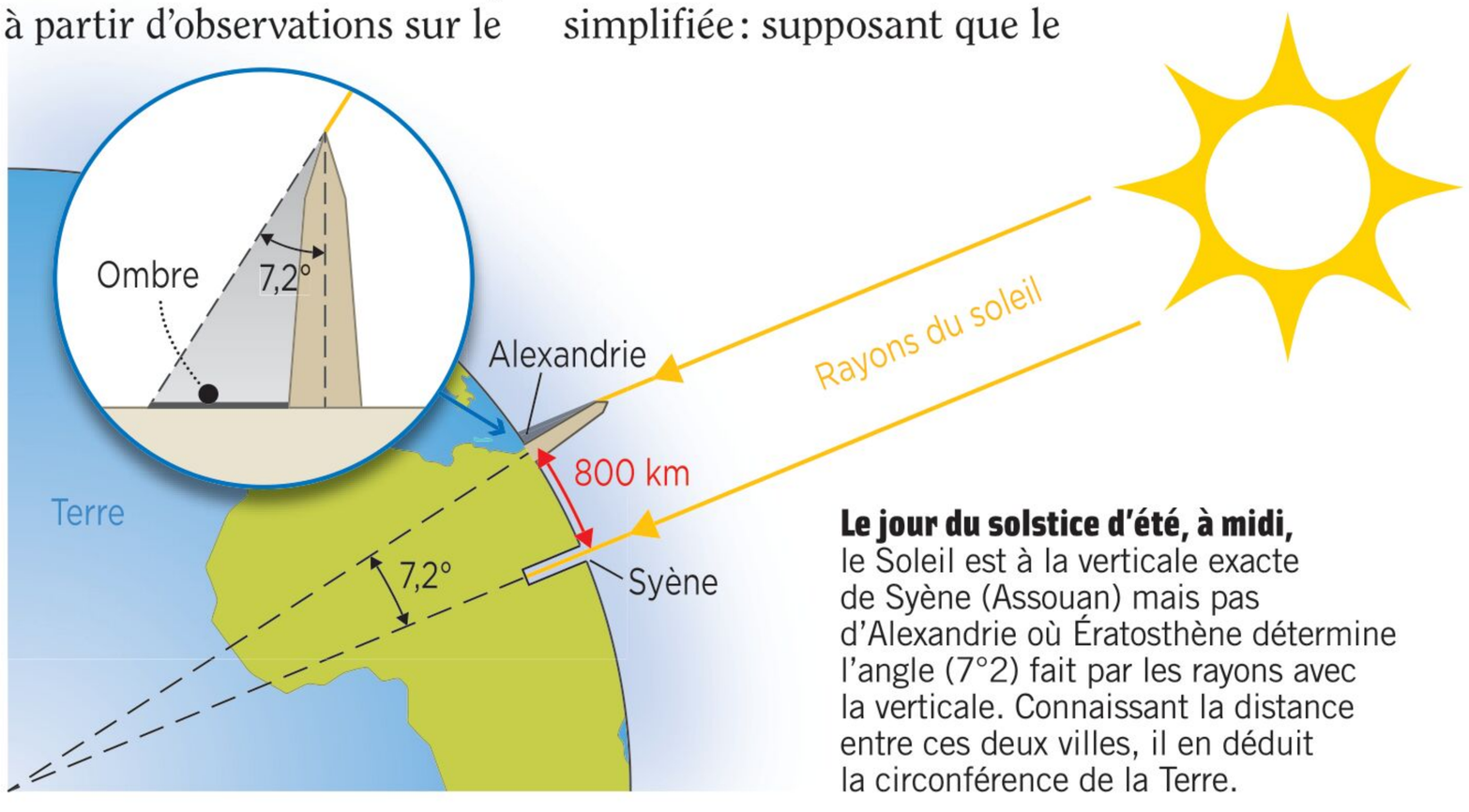
Patrick Flandrin, président de l'Académie des sciences

Vingt-quatre siècles pour **mesurer la Terre**

Déjà, les Grecs anciens avaient montré que notre planète est ronde. Mais il faudra attendre le foisonnement scientifique du XVIIIe siècle, et quelques périlleuses expéditions, pour préciser sa forme et ses dimensions exactes.

Les Anciens imaginaient toutes sortes de formes pour notre planète », raconte l'historien des sciences Arkan Simaan. Pythagore est le premier, vers 550 avant J.-C., à suggérer une forme sphérique. *« Selon lui, le démiurge créateur du monde, parfait géomètre et musicien, n'avait pu que créer une forme parfaite, la sphère. »* Sa proposition sera progressivement étayée par des arguments scientifiques robustes, ceux de Parménide en particulier, quelques décennies plus tard. Observant qu'en naviguant vers le sud depuis sa cité d'Élée, en Campanie, les sommets de Sicile apparaissent avant la côte, celui-ci en déduit une courbure nord-sud. En outre, à partir d'observations sur le coucher du Soleil, il calcule que si la Terre est plate suivant un axe est-ouest, son bord devrait se trouver à seulement 75 kilomètres actuels à l'ouest de sa position. Absurde, il le sait, car l'ouest du bassin méditerranéen lui est bien connu ! Il en conclut que la Terre est également courbée dans cette direction, donc sphérique.

« Avec Ératosthène, au IIIe siècle avant J.-C., les Grecs acquièrent déjà une idée assez précise de la circonférence de la Terre, souligne Arkan Simaan. *Fasciné par le reflet du Soleil au fond d'un puits à Syène (Assouan), le jour du solstice d'été à midi, signe que le Soleil est parfaitement à la verticale, il imagine une méthode astucieuse. »* En voici une version simplifiée : supposant que le Soleil est si éloigné de la Terre que ses rayons peuvent être considérés comme parallèles, et constatant qu'à Alexandrie un obélisque possède, lui, une ombre lors du solstice d'été, il mesure celle-ci, et en déduit l'angle (7,2°) que fait le Soleil avec la verticale. Cette valeur correspond aussi à l'écart de latitude par rapport à Syène. Un cercle (360°) valant cinquante fois 7,2°, la circonférence de la Terre est égale à 50 fois la distance qui sépare les deux sites, 800 kilomètres. *« Un calcul d'une précision remarquable*, note Arkan Simaan, *puisqu'il obtient une circonférence proche de 42 000 kilomètres, pour une valeur réelle d'environ 40 000 kilomètres. »*



BRUNO BOURGEOIS

Le jour du solstice d'été, à midi, le Soleil est à la verticale exacte de Syène (Assouan) mais pas d'Alexandrie où Ératosthène détermine l'angle (7°2) fait par les rayons avec la verticale. Connaissant la distance entre ces deux villes, il en déduit la circonférence de la Terre.

Arkan Simaan, *La Science au péril de sa vie. Les aventuriers de la mesure du monde,* Adapt, 2001

Jean-Paul Poirier, *Pierre Bouguer, un savant oublié (1698-1758),* L'Harmattan, 2022

Vincent Deparis et Hilaire Legros, *Voyage à l'intérieur de la Terre.* CNRS Éditions, 1999

La forme de la Terre dans l'histoire occidentale, sciav.fr/IGN-forme-terre

La forme de la Terre : plate, oblongue ou aplatie aux pôles ? sciav.fr/forme-Terre

Le battement trop lent de l'horloge de Richer

Ces savoirs vont être éclipsés avec l'avènement du christianisme. Mais *« aux XVIe et XVIIe siècles, des dizaines de savants ont tenté de mesurer la Terre avec précision,* rappelle Arkan Simaan. *On savait, par exemple, qu'un degré de latitude sépare Malvoisine, au sud de Paris, et Sourdon, au sud d'Amiens, sur le même méridien. »* La connaissance de la distance entre ces deux points permettrait d'extrapoler la circonférence terrestre. *« Certains vont aligner des chaînes, comme Richard Norwood entre Londres et York, et d'autres, tel Jean Fernel, compter les tours de roues de leur carrosse entre Paris et Amiens. »* Il faudra attendre les travaux de l'abbé Picard vers 1669 pour déterminer plus scientifiquement – à l'aide de triangulations permettant de s'affranchir du relief – la distance entre Amiens et Paris, soit 111 kilomètres. Ce qui aboutit à une circonférence terrestre de 39 960 kilomètres.

À cette époque, les savants français entendent aussi déterminer la distance du Soleil. L'idée

est de comparer l'angle sous lequel on voit la planète Mars lorsque la Terre passe entre celle-ci et le Soleil, en observant la planète rouge depuis deux endroits éloignés. L'astronome Jean-Dominique Cassini va faire les mesures à Paris, tandis que son collaborateur Jean Richer part en 1672 à Cayenne, non loin de l'équateur. De ces observations, le premier calcule une distance de 140 millions de kilomètres. Pas mal ! Les mesures donnent aujourd'hui 150 millions de kilomètres.

Mais Richer relève un détail qui va entraîner les géomètres dans une tout autre direction : le pendule de son horloge bat plus lentement en Guyane qu'à Paris, et le savant doit le raccourcir pour qu'il batte exactement la seconde. Or la fréquence de cet objet ne dépend que de sa longueur et de la pesanteur. Celle-ci serait-elle différente près de l'équateur ?

Une planète en forme de mandarine ou de melon ?

Alors que les savants s'acharnent à comprendre pourquoi le pendule accélère avec la latitude, Edmond Halley, lors d'un voyage à Sainte-Hélène, constate en 1676 qu'il ralentit avec l'altitude. La pesanteur diminuerait à mesure que l'on s'éloigne du centre de la Terre ? C'est ce que laisse entendre la loi de l'attraction universelle de Newton. Celui-ci va donc suggérer que la Terre est aplatie aux pôles, un peu comme une mandarine. Ce qui revient à dire qu'il y a plus de matière pesante entre la surface du sol et le centre de la Terre à l'équateur, donc plus de pesanteur, et explique les observations de Richer.

À l'époque, la rivalité est immense entre la France et sa voisine britannique. L'Académie royale des sciences rejette la théorie de Newton, qu'elle considère comme de la magie. Lui est ardemment soutenu par la Royal Society. La science française défend une planète en forme de melon. Comment trancher ? En répétant la mesure faite entre Paris et Amiens, mais à des latitudes très différentes. Si Newton a raison, cette longueur sera d'autant plus grande qu'on s'éloigne de l'équateur.

En France, Maupertuis et Voltaire, convertis à la physique newtonienne, vont travailler ensemble. Le premier s'efforce de convaincre l'Académie royale des sciences de mettre en place des expéditions quand le second se charge de « vendre » l'idée dans les salons parisiens. Avec succès… Un premier groupe quitte la France en 1735 pour rejoindre Quito, cité andine de l'Amérique espagnole. Il est dirigé par Louis Godin, un académicien qui se révélera incompétent, fort heureusement accompagné, entre autres, du mathématicien Pierre Bouguer et du géographe Charles-Marie de la Condamine. Il s'agit de mesurer un arc de méridien… et sans doute de rapporter de précieuses informations sur les richesses de cette région. Une seconde expédition, dirigée par Maupertuis, rejoint la Laponie en 1736. Elle reviendra triomphalement deux ans plus tard, forte du constat qu'un degré de latitude est plus long à 66° de latitude nord (111,948 kilomètres) qu'à Paris (111,153 kilomètres). Bouguer ne rentrera, lui, qu'en 1744, annonçant une longueur de… 110,613 kilomètres. Isaac Newton avait donc raison – ce qui valide l'attraction universelle, au grand dam de l'Académie royale des sciences. La terre est bien aplatie aux pôles.

DENIS DELBECQ

DOMAINE PUBLIC

Une image familière depuis… 1959. Cette année-là, le satellite américain Explorer 6 prend les premiers clichés, en noir et blanc, de la Terre. Ouvrant la voie à des progrès spectaculaires dans la caractérisation de notre planète.

WIKIPEDIA CC/G.P. BRUCH

« AUX XVIE ET XVIIE SIÈCLES, DES DIZAINES DE SAVANTS TENTENT DE MESURER LA TERRE AVEC PRÉCISION. L'UN D'EUX COMPTE LES TOURS DE ROUES DE SON CARROSSE DE PARIS À AMIENS »

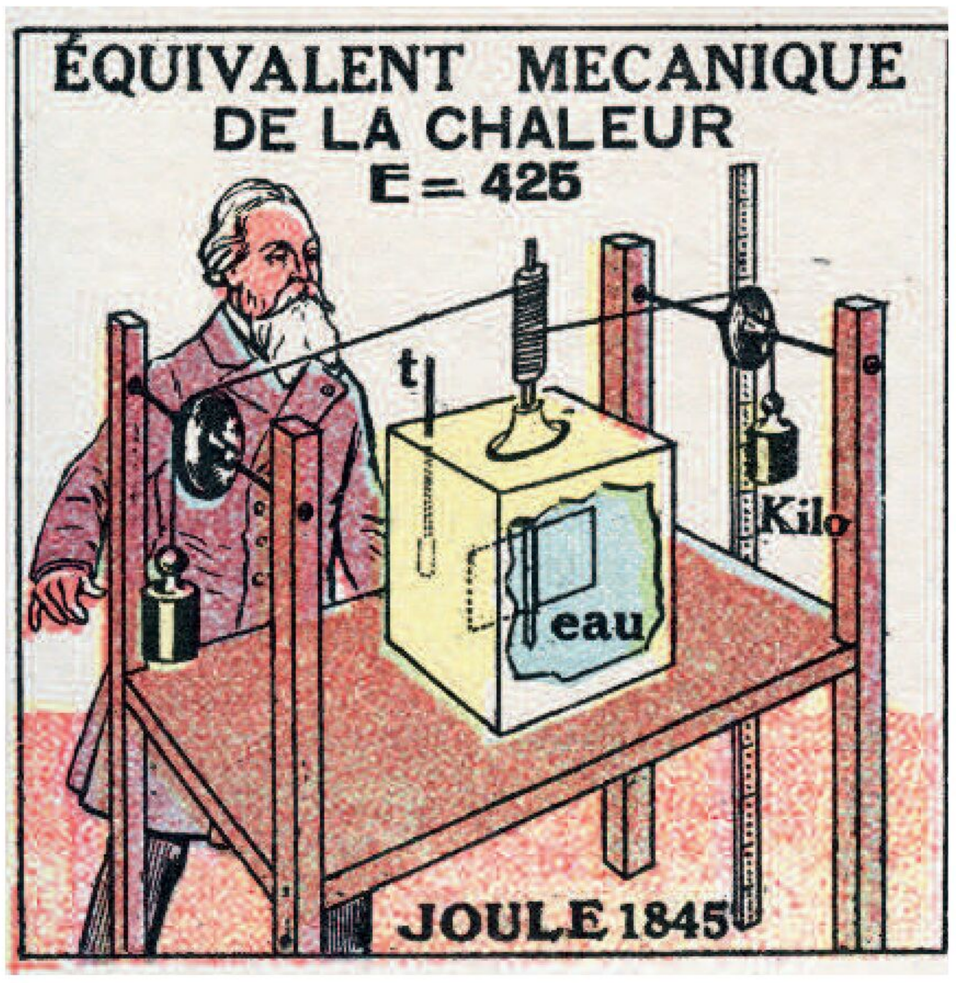
Arkan Simaan, historien des sciences

Quand **la chaleur** met les savants en ébullition

Est-ce un fluide invisible ou une propriété de la matière ? Pendant plus d'un siècle, les physiciens tentent de percer le mystère de la chaleur. Avant de comprendre, à partir de 1860, qu'elle résulte de l'agitation des molécules.

Demandez à vos proches : « qu'est-ce que la chaleur ? » Ils vous répondront sans doute « température » : la mesure, donc, d'une propriété reliée à la chaleur, mais qui n'est pas celle-ci. Mais quelle est donc, alors, sa nature ? Elle resta longtemps un mystère. « *Contrairement à ce qui s'est passé dans d'autres domaines, l'application industrielle a précédé la compréhension,* reconnaît Emanuel Bertrand, maître de conférences à l'ESPCI Paris-PSL. *On s'est d'abord posé la question de la possibilité de transformer la chaleur en énergie mécanique.* »

La première machine à vapeur industrielle est due à l'ingénieur anglais Thomas Newcomen, qui l'utilise dans les mines de charbon en 1712 pour évacuer l'eau stagnante des galeries souterraines. L'ingénieur écossais James Watt améliore son rendement entre 1763 et 1769, ouvrant la voie à la révolution industrielle. On sait donc alors utiliser la puissance motrice de la chaleur… sans encore la comprendre. Mais la connaissance du concept finira par suivre. Le chimiste français Antoine Lavoisier, dans son traité de 1770, affirme que la chaleur est due à un fluide invisible et sans masse, le calorique, qui circule entre les molécules et peut passer d'un corps à un autre tout en se conservant. Sur cette base, l'ingénieur français Sadi Carnot, sans le formaliser mathématiquement, conclura en 1824 que le rendement d'une machine à vapeur dépend uniquement de la différence de température entre les réservoirs chaud et froid : plus celle-ci est élevée, plus le transfert de chaleur sera important. Il invente alors ce que Rudolf Clausius appellera en 1850 le second principe de la thermodynamique, terme forgé par William Thomson, le futur Lord Kelvin, l'année précédente : « Toute transformation d'un système thermodynamique s'effectue avec augmentation de l'entropie globale [le degré de désorganisation] ».



STEFANO BIANCHETTI / BRIDGEMAN IMAGES

Le calorimètre conçu par James Joule lui permit de constater, en 1845, que l'agitation de l'eau par les pales d'un tambour entraîne une élévation de sa température.

Démocrite remis au goût du jour… en 1808 !

« *Carnot a trouvé le bon résultat par une suite d'erreurs qui se sont compensées,* souligne Emanuel Bertrand. *La première étant que la chaleur se conserve.* » Ce que démentent en même temps, et indépendamment, l'Anglais James Joule, l'Allemand Julius von Mayer et le Danois Ludwig Colding entre 1842 et 1843. Tous trois établissent expérimentalement le principe d'équivalence entre la chaleur et l'énergie transférée par le système (appelée travail). En 1850, Rudolf Clausius va plus loin : selon lui, ce qui se conserve, ce n'est pas la chaleur, comme l'avait avancé Lavoisier, mais la somme de la chaleur et du travail, donc l'énergie interne totale d'un système. À ce principe, il ajoute une hypothèse alors impossible à vérifier expérimentalement : c'est le mouvement des molécules qui produit la chaleur. Dix ans plus tard, James Maxwell publiera sa théorie cinétique des gaz, dans laquelle il fera le lien

JULIETTELANCEL

« L'ANNÉE 1872 EST UNE DATE-CLÉ. LUDWIG BOLTZMANN DÉCRIT LA CHALEUR COMME UNE CONSÉQUENCE DES PROPRIÉTÉS MICROSCOPIQUES DE LA MATIÈRE »

Emanuel Bertrand, maître de conférences à l'ESPCI Paris-PSL et chercheur en histoire des sciences au centre Alexandre-Koyré

Les éruptions solaires peuvent perturber le champ magnétique terrestre, mais n'ont aucune influence sur la température de l'atmosphère de notre planète.

SHUTTERSTOCK

Chauffés par la lumière du Soleil

Si le Soleil nous éclaire, il ne nous chauffe pas directement, puisque la chaleur se transmet par l'agitation de la matière et que l'espace interplanétaire est quasi vide. En revanche, il se chauffe lui-même. Mais quelle est la source de sa chaleur? Au début du XIXe siècle, les savants imaginèrent que sa matière se consumait, à la manière d'un tas de bois qui brûle. Mais dans cette hypothèse, le Soleil n'aurait que quelques milliers d'années à vivre… En 1853, l'Anglais John Waterstone pensa à l'énergie dégagée par la contraction gravitationnelle de l'astre. Lord Kelvin et Hermann von Helmholtz calculèrent que le Soleil devait alors avoir quelques millions d'années. Mais les études de sédimentation de Charles Lyell, appuyé par Charles Darwin, indiquaient un âge de la Terre d'au moins plusieurs centaines de millions d'années… En 1919, le Français Jean Perrin émet la bonne hypothèse : l'énergie de l'astre provient de la fusion nucléaire qui se déroule en son cœur, convertissant l'hydrogène en hélium. Des réactions dont l'Allemand Hans Bethe, exilé aux États-Unis, donne le détail en 1939 : chaque seconde, 620 millions de tonnes d'hydrogène se transforment en 615,7 millions de tonnes d'hélium.

« *La différence de masse est convertie en énergie rayonnée sous forme de photons, conformément à l'équivalence entre la masse et l'énergie montrée par la célèbre équation d'Einstein* », explique Milan Maksimovic, directeur de recherche à l'Observatoire de Paris-Meudon. Les photons émis tentent de sortir du Soleil, mais sont sans cesse absorbés par la matière solaire qui en réémet d'autres et s'agite en tous sens. En se désexcitant, ces molécules émettent d'autres photons. Au bout de 700 000 ans en moyenne, les photons parviennent au niveau de la photosphère et s'échappent dans le milieu interplanétaire. Ils ont alors perdu de l'énergie, ce qui diminue l'agitation de la matière et donc la chaleur. De 15 millions de degrés au cœur de l'astre, la température passe à 6 051 °C au niveau de sa photosphère, la surface visible du Soleil. De là, les photons viennent heurter l'atmosphère de la Terre en lui cédant de l'énergie. Excitées par cette absorption, les molécules d'azote et d'oxygène reviennent à leur état stable en réémettant des photons de plus basse énergie. Le sol renvoie cette lumière par rayonnement thermique vers l'atmosphère : vu la température moyenne de notre planète – 15°C –, il émet alors des photons infrarouges. Cette lumière est en partie absorbée par certains gaz de l'atmosphère, dits à effet de serre, et réémise vers le sol. Et la Terre se réchauffe encore un peu plus.

entre, d'une part, la température et la pression du gaz et, d'autre part, l'agitation des centaines de milliers de milliards de milliards de molécules qui le composent.

Une théorie que le physicien autrichien Ludwig Boltzmann utilise en 1872 pour décrire la chaleur comme la manifestation, à notre échelle, de l'agitation des molécules. « *Pour moi, c'est la date-clé. La chaleur devient une conséquence des propriétés microscopiques de la matière* », déclare Emanuel Bertrand. Hélas, la proposition de Boltzmann est très controversée car elle s'appuie sur la théorie atomiste du Grec Démocrite, remise au goût du jour en 1808 par le chimiste anglais John Dalton mais qui ne fera consensus qu'en 1913. C'est à cette date que le physicien français Jean Perrin en convainc la communauté scientifique en retrouvant dans une dizaine d'expériences différentes le nombre d'Avogadro. Cette constante chimique permet de relier le monde microscopique (le nombre d'atomes) au monde macroscopique (les moles), accessible aux expériences.

Une fois l'existence des atomes acceptée, les physiciens vont continuer à affiner les théories thermodynamiques pendant tout le XXe siècle, en particulier dans les cas hors d'équilibre, quand au moins une des variables (température, pression…) n'est pas constante dans le système. Ces études vaudront à l'Américain Lars Onsager le prix Nobel de chimie, en 1968. Le Belge né en Russie Ilya Prigogine l'obtiendra en 1977 pour les structures dissipatives, des systèmes qui s'organisent en échangeant de l'énergie avec leur environnement. Le sujet est encore chaud…

JACQUES-OLIVIER BARUCH

Emanuel Bertrand, *Extension du domaine de la thermodynamique. Alliances et controverses*, Garnier, à paraître en 2023

Les arpenteurs du Cosmos à l'assaut de la **voûte céleste**

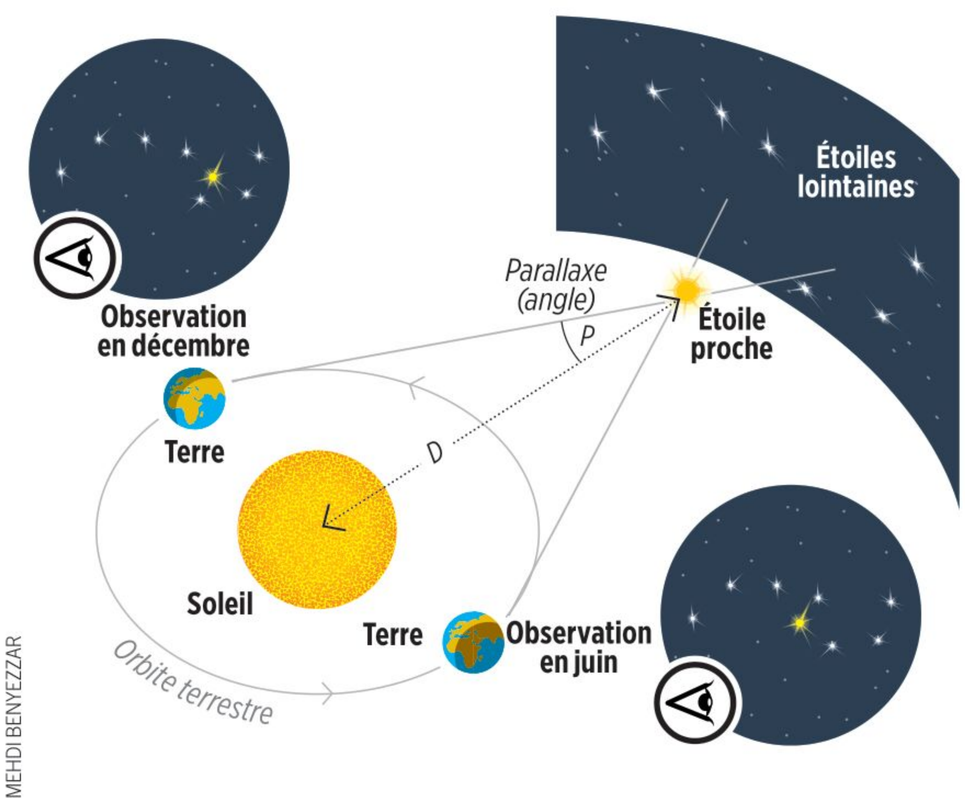
Balayés, Aristote et sa sphère des fixes ! À partir du XVIIe siècle, les astronomes parviennent à déterminer la distance des étoiles, accédant ainsi à un Univers en trois dimensions.

Qu'est-ce qu'une étoile ? Plusieurs milliers d'années d'efforts ont été nécessaires pour répondre à cette question si simple en apparence. D'abord l'astrométrie, la branche de l'astronomie dédiée à la mesure de la position et du mouvement des corps célestes, puis l'astrophysique, qui se consacre à l'étude de leurs propriétés, ont permis d'établir la nature matérielle de ces infimes apparitions nocturnes, fondement de notre conception actuelle de l'Univers : celle d'un espace ouvert aux frontières indéfinissables où le Soleil, le Système solaire et la Voie lactée ont cessé d'occuper une place centrale pour devenir des entités contingentes, banales et, au bout du compte, indiscernables des myriades d'autres objets qui peuplent le Cosmos…

Contemplée par une nuit d'été, la voûte céleste peut paraître éternelle. Les milliers d'étoiles visibles à l'œil nu dessinent dans le ciel des constellations en apparence immuables. Seule une poignée d'astres « errants », la Lune, les planètes, puis le Soleil dans la journée, semblent animer la fixité de ce spectacle grandiose… De cette observation, les Anciens, parmi lesquels l'illustre Aristote, concluaient que les étoiles étaient attachées à une sphère centrée sur la Terre. Certains avançaient même qu'elles pourraient ne pas correspondre à des objets, mais à des orifices laissant passer la lumière d'un feu allumé à l'arrière-plan.

« Aussi bizarre que l'on puisse la juger de nos jours, cette théorie d'un Univers clos sera privilégiée par les savants jusqu'à la Renaissance et l'arrivée de la lunette astronomique de Galilée », explique l'astronome et responsable scientifique de Gaia France, François Mignard. En dévoilant des astres indiscernables à l'œil nu, puis en établissant que plus le pouvoir grossissant de la lentille augmente, plus on peut les détecter en nombre, l'invention fait voler en éclats la thèse de la sphère céleste. Les étoiles sont dispersées à des distances variables de la Terre. Elles ne sont pas fixes non plus, comme va bientôt l'établir l'astronome britannique Edmond Halley. Il remarque que les positions sur le ciel de Sirius et d'Arcturus sont différentes de celles inscrites par Ptolémée mille six cents ans plus tôt dans son catalogue et démontre, en 1718, l'existence du « mouvement propre » des astres.

Une mesure d'éloignement



MEHDI BENYEZZAR

La parallaxe correspond au changement de la position apparente d'un astre dû au déplacement de l'observateur. Depuis la Terre, celui-ci voit une étoile « proche » se projeter à une position précise au milieu d'astres plus lointains. Six mois plus tard, il constatera que cette même étoile semble s'être déplacée. D'un point de vue géométrique, la parallaxe se mesure par l'angle sous lequel on verrait le rayon de l'orbite terrestre depuis l'étoile.

Une première estimation basée sur leur éclat

Entretemps, la science a énormément progressé. *« En 1672, Jean Picard, Jean-Dominique Cassini et Jean Richer ont réussi à déterminer la distance Terre-Mars* (lire aussi p. 56)*, ce qui leur a permis, en appliquant les lois de Kepler, d'en déduire celle séparant la Terre du Soleil*, poursuit l'astronome. *À la même époque, le Hollandais Christiaan Huygens a proposé une première estimation de l'éloignement des étoiles, basée sur une comparaison de leur éclat avec celui de notre astre. »* Mais il faudra attendre 1838 et les travaux de Friedrich Bessel pour qu'une première mesure directe de cette grandeur soit réalisée par la méthode des « parallaxes géométriques », qui consiste à déterminer l'angle sous lequel serait vu notre système solaire depuis un astre : elle indique que l'étoile 61 du Cygne est située à 10,3 années-lumière de la Terre.

Un exploit ! *« En effet, la lumière constitue la seule source d'information sur les étoiles. Or, pour déduire de l'éclat apparent d'un astre sa luminosité intrinsèque, et donc obtenir des renseignements sur certaines de ses caractéristiques*

ESO/A.SANTERNE

physiques, la connaissance de la distance est indispensable. »
Si l'on admet que la masse et l'âge des objets stellaires déterminent la quantité d'énergie qu'ils « rayonnent », c'est tout le savoir sur les populations et la nature des corps lumineux du cosmos qui est fondé sur ce travail d'arpenteur !

1,8 milliard d'étoiles dans le catalogue de Gaia

La découverte de Bessel a un retentissement considérable. D'autant qu'en 1859, un jeune physicien allemand, Gustav Kirchhoff, parvient à établir les propriétés du spectre des gaz chauds, ce qui permettra, quelques années plus tard, de développer la spectroscopie appliquée aux sources astronomiques. Grâce à ce procédé, les savants peuvent analyser la lumière des étoiles et des nébuleuses en vue de déchiffrer leur composition chimique. C'est la naissance de l'astrophysique. Cette nouvelle discipline prometteuse attire alors les jeunes chercheurs qui délaissent l'astrométrie, peu à peu cantonnée à des activités de service comme la détermination des longitudes. Toutefois, le nombre d'étoiles dont la distance est connue ne s'accroît que très lentement. La méthode employée pour établir l'éloignement de 61 Cygni – des dizaines d'observations sur plusieurs années, par temps clair – s'avère particulièrement lourde à mettre en œuvre. En 1985, on ne recense encore qu'à peine 6 000 étoiles !
« Cette situation perdurera jusqu'à ce qu'on comprenne – dans les années 1960 – les raisons de cette stagnation. Pour établir la parallaxe géométrique d'une étoile et connaître son éloignement, il faut disposer d'images. Or, ces dernières sont dégradées par la présence de l'atmosphère », rappelle François Mignard.

Le mouvement apparent des étoiles dans le ciel chilien, au-dessus de l'un des télescopes de l'observatoire de La Silla. C'est l'astronome Edmond Halley (1656-1742) qui établit que les étoiles ne sont pas fixes, comme on le pensait depuis Aristote.

D'où l'idée de procéder aux mesures directement depuis l'espace, objectif de la mission Hipparcos en 1989. Ce satellite de l'ESA (Agence spatiale européenne) va mesurer les distances de 120 000 étoiles et fournir ainsi aux astrophysiciens les données indispensables au calibrage de leurs instruments. C'est aussi à cette tâche que se consacre Gaia, autre mission de l'ESA, lancée en 2013. Le 13 juin dernier, elle a livré à la communauté scientifique une première version « complète » de son catalogue : 1,8 milliard d'étoiles représentant 1 % de notre galaxie, dont elle est parvenue à recenser la position et la distance et, pour des dizaines de millions d'entre elles, la vitesse ou différentes propriétés physiques. Une performance qui a permis non seulement de repousser les limites du monde connu jusqu'au centre galactique, à 25 000 années-lumière de la Terre, mais également d'ouvrir un nouveau grand chapitre de l'histoire de l'astronomie : celui de l'étude de la dynamique et de l'évolution de la Voie lactée. Les Anciens avaient raison : *sic itur ad astra* (ainsi atteint-on les étoiles). **VAHÉ TER MINASSIAN**

SERVICE COMMUNICATION UNS-A.MACARRI

« AUSSI BIZARRE QUE L'ON PUISSE LA JUGER AUJOURD'HUI, LA THÉORIE D'UN UNIVERS CLOS SERA PRIVILÉGIÉE PAR LES SAVANTS JUSQU'À L'ARRIVÉE DE LA LUNETTE DE GALILÉE »

François Mignard, astronome et responsable scientifique de Gaia France

SHUTTERSTOCK

LES OUTILS DU PHYSICIEN

Pour édifier, vérifier… et parfois abandonner leurs théories, physiciennes et physiciens disposent d'outils variés : des équations, bien sûr. Mais aussi les indispensables discussions entre collègues… Et même la vision, en pensée, d'un démon tout-puissant ou d'un chat mort *et* vivant !

Les mathématiques, efficace langage de la physique

La rencontre des deux sciences a lieu lorsque Galilée considère que tout, dans l'Univers, peut s'exprimer en langage mathématique. Un postulat d'une redoutable efficience puisqu'il permet de comprendre et d'anticiper des phénomènes inaccessibles aux sens.

La citation de Galilée à propos de l'Univers est célèbre : c'est un *« livre immense perpétuellement ouvert devant nos yeux [...] écrit en langue mathématique, et ses caractères sont des triangles, des cercles et d'autres figures géométriques sans l'intermédiaire desquelles il est humainement impossible d'en comprendre un seul mot »*. Il nous semble aujourd'hui évident que physique et mathématiques sont étroitement liées. Pour étudier les phénomènes, physiciennes et physiciens puisent en effet de nombreux instruments dans leurs différentes branches, que ce soit la géométrie (pour décrire l'espace), l'analyse (pour résoudre des équations du mouvement des objets), ou encore l'algèbre (pour étudier les symétries). Pourtant, elles sont plus qu'une simple boîte à outils pour la physique. *« Il y a un dialogue entre les deux disciplines »*, souligne Évelyne Barbin, historienne des sciences à l'université de Nantes.

Cette relation dialectique n'a pas toujours été d'actualité. Avant le XVII^e^ siècle, dont Galilée est l'une des figures emblématiques – mais pas la seule –, la physique a peu à voir avec les mathématiques (à quelques exceptions près, comme celle d'Archimède). Pour Aristote, dont l'influence jusqu'à l'époque moderne est prépondérante, il ne doit exister aucun mélange de genre entre les différentes sciences, qui ont chacune ses propres prémisses. Celles de l'astronomie – qui régissent le Cosmos – ne sont pas celles de la physique, qui s'appliquent à la Terre. Celles de la géométrie ne sont même pas celles de l'arithmétique. En physique, Aristote se demande quelles sont les causes des phénomènes. Ce qui l'amène à affirmer que les corps tombent *parce que* leur « lieu naturel » se situe en bas, sans proposer de concept de vitesse.

Mais à partir de la Renaissance, les questions que se posent les savants évoluent, passant de « pourquoi un objet tombe-t-il ? » à « comment tombe-t-il ? ». Un des moteurs de ces questionnements vient de la balistique, avec l'apparition de canons dont on peut modifier l'angle de tir : comment régler l'inclinaison pour envoyer le projectile le plus loin possible ? Il s'agit donc, pour résoudre un problème concret, de trouver une relation entre angle et portée, relation qui passe par les mathématiques.

Pour comprendre comment le mouvement est *« naturellement accéléré »*, selon l'expression de Galilée dans ses *Discours concernant deux sciences nouvelles,* le savant italien s'appuie sur l'observation et l'hypothèse que la vitesse d'un objet (une bille sur un plan incliné ou un boulet de canon) augmente au cours du temps. Il démontre ensuite mathématiquement (par une méthode géométrique) que la distance parcourue est proportionnelle au carré du temps de trajet. Puis que, si la bille roule sur une table

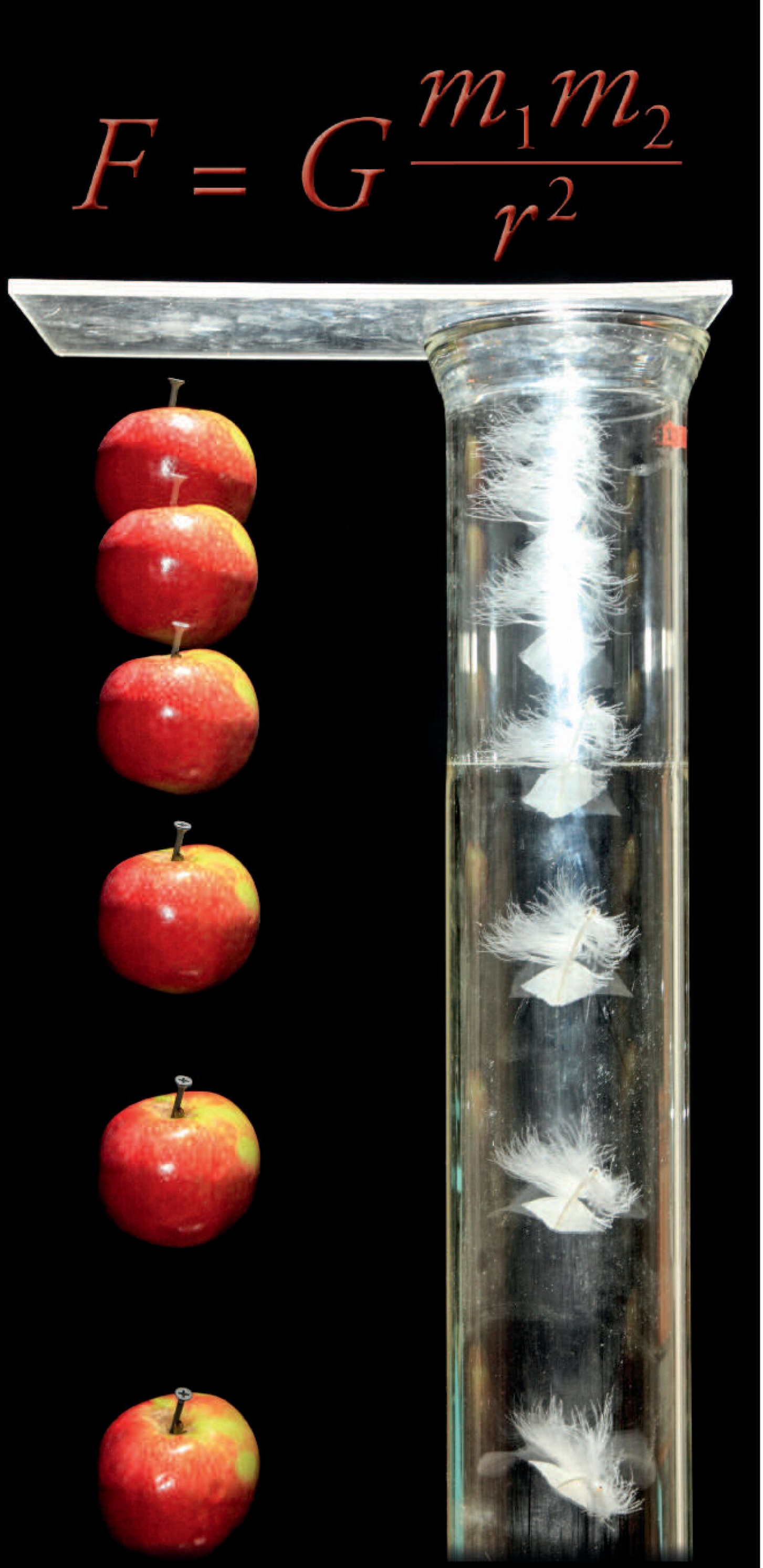
Évelyne Barbin, *La Révolution mathématique du XVII^e^ siècle*, Ellipses, 2019

Les mathématiques de/dans la physique, entretien avec Jean-Marc Lévy-Leblond : https://sciav.fr/physiquemaths

WIKIPEDIA CC

« AVEC GALILÉE, UNE COURBE COMME LA PARABOLE N'EST PLUS UNIQUEMENT LA SECTION D'UN CÔNE PAR UN PLAN. ELLE PEUT AUSSI ÊTRE VUE COMME LA TRAJECTOIRE D'UN POINT EN MOUVEMENT »

Évelyne Barbin, historienne des sciences, spécialiste des mathématiques



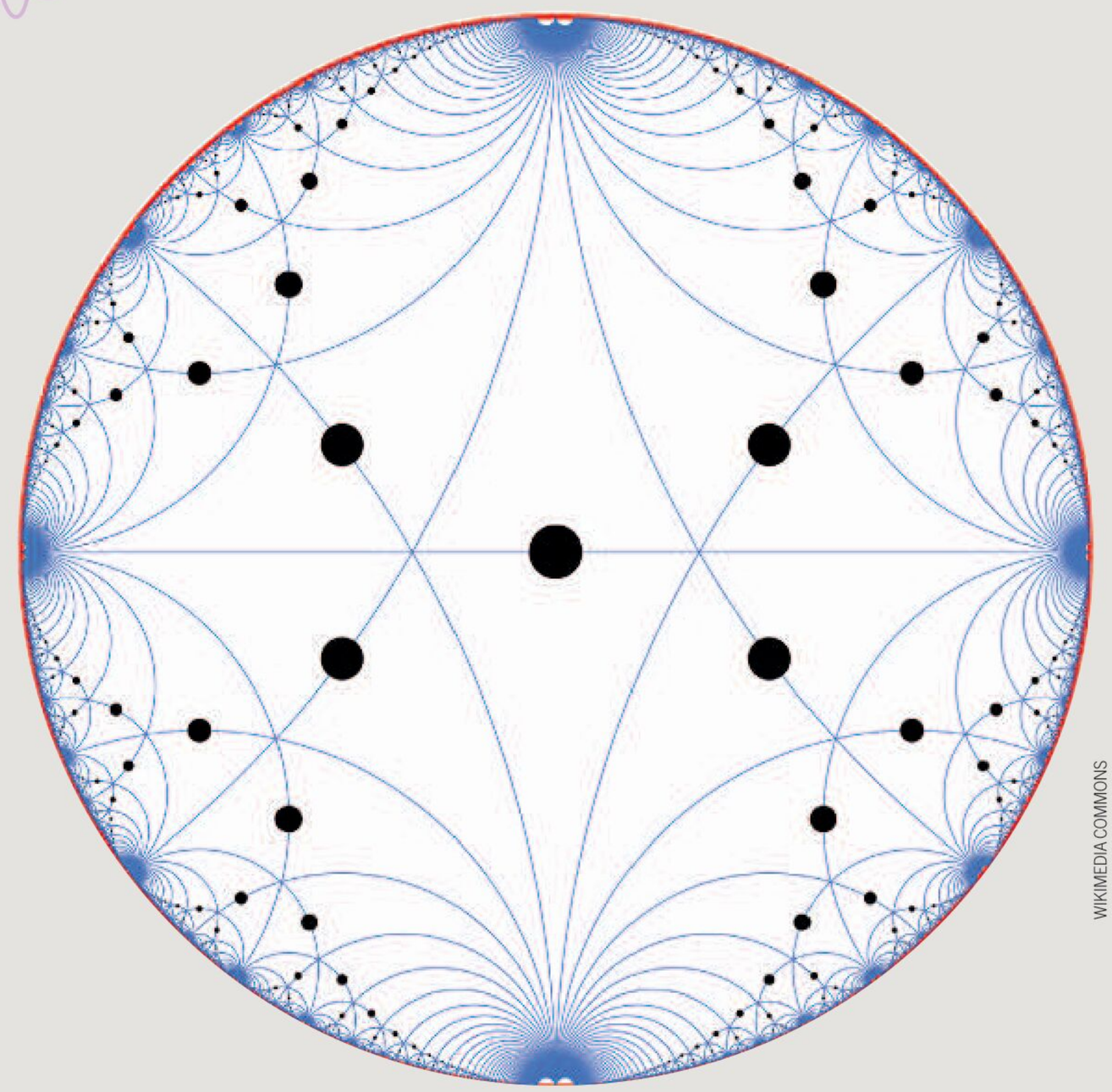
Un phénomène aussi banal que la chute d'une pomme ou d'une plume peut être traduit dans un langage mathématique : c'est la grande découverte de Galilée. Il sera suivi par Newton, qui énoncera la loi de la gravité. Ici, si les deux objets, lâchés en même temps, chutent à la même vitesse, c'est que la plume a été placée dans une chambre à vide qui supprime en partie la résistance de l'air.

TED KINSMAN/SCIENCE PHOTO LIBRARY/SUCRÉ SALÉ

puis chute à terre, sa trajectoire suit une courbe en forme de parabole (en l'absence de frottement de l'air). Enfin, il détaille comment il a réalisé ses expériences et expose des tables numériques qui valident son raisonnement.
Mathématisation et expérimentation sont donc intimement liées dans ce processus de découverte. Ce ne sont pas les mathématiques qui viennent avant la physique, ni l'inverse. Pour Jean-Marc Lévy-Leblond, physicien à l'université de Nice-Côte d'Azur, *« les mathématiques s'impliquent en physique, plus qu'elles ne s'appliquent »*. En l'occurrence, elles vont être grandement modifiées par les questionnements de la physique du XVII[e] siècle. *« Dans l'Antiquité, une courbe comme la parabole est définie uniquement comme une section d'un cône par un plan*, explique Évelyne Barbin. *Avec Galilée, elle peut désormais être aussi vue comme la trajectoire d'un point en mouvement, ce qui va changer beaucoup de choses pour les mathématiques. »* C'est *« l'invention du courbe »*, selon les termes de la chercheuse : la notion s'élargit au-delà de quelques courbes particulières.

Les fluxions de Newton, éclipsées par le calcul différentiel de Leibniz

Galilée énonce donc la loi de la chute des corps, mais il ne dispose pas du concept mathématisé de vitesse. Celui-ci ne sera défini que plus tard, comme la dérivée de la position par rapport au temps. Pour obtenir une vitesse, il faut calculer le déplacement effectué pendant un intervalle de temps et diviser cette valeur par la durée de l'intervalle. En dérivant la vitesse par rapport au temps, on obtient ensuite l'accélération. Mais le résultat est peu précis, puisqu'on obtient une valeur moyenne. Pour parvenir à une plus grande finesse, l'intervalle doit être infinitésimal, c'est-à-dire aussi petit que l'on veut. Or, à l'époque de Galilée, le concept d'infini est encore mal maîtrisé. Cela ne reviendrait-il pas à diviser par zéro, une opération qui n'est pas définie ?
Le domptage du calcul infinitésimal, à partir de la fin du XVII[e] siècle, sera un immense progrès. On le doit notamment aux travaux indépendants de Leibniz sur le calcul qu'il appelle « différentiel » et de Newton, dont la méthode des fluxions – terme que le savant anglais emploie pour dire vitesse – est équivalente, mais connaîtra une moindre postérité. Newton, cependant, recourt surtout à la géométrie pour rédiger ses fameux *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, n'employant le calcul infinitésimal qu'à la marge. Son opus contient néanmoins ce qu'on désigne aujourd'hui par la seconde loi de Newton : la force qui s'ap- ◆◆◆



WIKIMEDIA COMMONS

Ce disque de Poincaré est une représentation d'un espace dont la géométrie n'est pas euclidienne. Il définit des transformations qui peuvent s'exprimer par un groupe de symétrie. Ce type de groupe apparaît en physique afin de mieux comprendre les invariances.

Théorie des groupes : la symétrie mathématisée

L'usage des mathématiques en physique ne se limite pas à celui des nombres, des techniques de calcul ou même des équations théoriques. Ainsi la théorie des groupes, développée à partir du XIXe siècle sans lien avec la physique, va rapidement servir à mathématiser la notion de symétrie, abondante dans les phénomènes naturels.
Le groupe de symétrie d'un objet est l'ensemble des transformations qui le laissent inchangé. Prenez par exemple un triangle équilatéral. Si vous le faites tourner à 360°, le triangle reste identique. Si vous le tournez de 120°, 240° ou 360°, vous obtiendrez aussi une figure similaire. Même chose si vous effectuez une symétrie miroir par chacune des médiatrices du triangle. Il s'agit là de quelques-unes des propriétés élémentaires qui permettent aux mathématiciens d'affirmer que ces six transformations forment le groupe de symétrie du triangle.
La théorie des groupes a rapidement trouvé une application pour classifier les différents types de cristaux en fonction des symétries du motif élémentaire qui les constitue. Mais son rôle en physique va bien au-delà. La mathématicienne allemande Emmy Noether a ainsi démontré, au début du XXe siècle, un des théorèmes les plus importants pour la physique : si une transformation par symétrie ne change pas un système physique, alors une des valeurs mesurables de celui-ci reste constante (l'énergie par exemple).
La notion de groupe se retrouve dans de nombreuses branches de la physique, et notamment en physique des particules : l'existence des quarks (les particules élémentaires qui constituent protons et neutrons notamment) a été proposée théoriquement dans les années 1960 à partir d'une hypothèse fournie par la théorie des groupes pour expliquer la diversité des phénomènes expérimentaux… Bref, ces structures abstraites unifient, organisent… et donnent parfois des pistes pour savoir où chercher.

plique à un objet est égale à sa masse multipliée par son accélération. Il s'agit bien là d'une équation différentielle, qui met en jeu les dérivées d'une fonction. En la résolvant (en « l'intégrant », disent les mathématiciens), on peut remonter à la position de l'objet, donc décrire sa trajectoire et prédire la suite de son trajet.

Bien plus efficaces que le langage courant pour conceptualiser le monde

Le tour de force de Newton consiste à unifier la chute des objets sur Terre et la course des corps célestes dans une même loi mathématique « universelle ». Cette approche sera poursuivie et à partir du XVIIIe siècle, des phénomènes comme l'élasticité, l'électricité et le magnétisme, le comportement des fluides et de la chaleur, seront peu à peu mathématisés. *« C'est le début d'une accumulation de succès prédictifs, par exemple le retour de la comète de Halley en 1759 »,* note Anouk Barberousse, philosophe des sciences à Sorbonne Université. Évelyne Barbin résume cette approche : *« Devant un phénomène de la nature, il faut essayer de le ramener à une ou plusieurs équations différentielles, puis résoudre celles-ci. »* Quitte à utiliser des méthodes d'approximations lorsque les solutions exactes sont impossibles à calculer. Leur établissement constitue d'ailleurs encore aujourd'hui une part importante des mathématiques en physique : les ordinateurs, notamment, rendent applicables des méthodes complexes, comme celle dite de Monte-Carlo, qui utilise les probabilités pour obtenir des solutions mathématiques approchées.
Par leur univocité, leur clarté, leur capacité à exprimer des régularités, les mathématiques se sont imposées comme un moyen de conceptualiser la physique bien plus efficace que le langage courant. Avec une conséquence sociale inattendue : la disparition progressive des amateurs en tant que participants à l'avancée des connaissances. Une solide formation mathématique devient un prérequis. Ainsi, si Voltaire est au XVIIIe siècle l'un des principaux avocats de la physique newtonienne en France, c'est sa compagne, Émilie du Châtelet, bien meilleure mathématicienne que lui, qui traduit et commente les *Principes mathématiques*.
Les mathématiques permettent non seulement de forger des concepts (vitesse, accélération, force, champs, etc.) ou d'en apprivoiser d'autres de nature jusqu'alors presque métaphysique (infini, hasard, chaos, etc.), elles dégagent aussi des structures communes qui semblent à priori apparaître dans des domaines variés (par exemple la théorie des groupes, *lire l'encadré*).

Elles offrent également la possibilité d'observer les différentes facettes d'un même phénomène. Les lois de Newton, par exemple, ont été reformulées notamment par Lagrange au XVIIIe siècle, puis par Hamilton au XIXe siècle. *« Ces écritures sont formellement équivalentes à celle de Newton, mais conceptuellement différentes*, explique Jean-Marc Lévy-Leblond. *Ce polymorphisme de la physique apporte de la richesse. »* Elles sont plus abstraites, puisqu'elles font appel à des coordonnées généralisées au-delà des simples position et vitesse des particules. Et sont plus adaptées à certains problèmes, notamment lorsque plus de deux objets sont en interaction. Plutôt que de faire appel à la notion de force, comme chez Newton, elles utilisent des fonctions qui peuvent s'interpréter en termes d'énergie du système. Ainsi, le formalisme hamiltonien facilitera la structuration de la physique quantique au XXe siècle, alors qu'il a été inventé bien avant.

NPL/OPALE.PHOTO

Émilie du Châtelet fut *« la femme de France qui avait le plus de dispositions pour toutes les sciences »*, selon Voltaire, son compagnon pendant quinze ans. La traduction des *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* de Newton par cette grande mathématicienne fait toujours autorité. Portrait d'après Maurice Quentin de La Tour.

Les phénomènes biologiques, trop complexes pour être mathématisés ?

Finalement, pourquoi les mathématiques sont-elles si efficaces en physique ? Seraient-elles non pas une représentation permettant de décrire le monde, mais carrément ce qui le constitue ? *« C'est là une position très spéculative,* objecte Anouk Barberousse. *Elle s'oppose à une conception plus triviale, selon laquelle les mathématiques utilisées pour étudier les phénomènes physiques ont simplement été sélectionnées dans l'histoire : les outils mathématiques efficaces ont été conservés. »*
Le physicien Eugene Wigner (1902-1995) s'étonnait de cette « déraisonnable » efficacité. *« Mais au fond,* souligne Jean-Marc Lévy-Leblond, *la physique s'occupe de systèmes simples, même s'ils peuvent paraître étranges ou éloignés de notre intuition. Même les interactions existant au sein d'un noyau atomique sont loin d'atteindre la complexité du réseau d'interactions dans une cellule vivante, par exemple. »* Ce serait la raison pour laquelle les mathématiques s'appliqueraient moins bien en biologie, du moins pour l'instant, contrairement à ce que laissait espérer la phrase de Galilée qui englobait l'ensemble des phénomènes naturels. Jean-Marc Lévy-Leblond propose de prendre la question à l'envers : *« Personnellement, je définirai la physique non pas par son objet d'étude, mais justement comme le domaine des sciences expérimentales où les mathématiques jouent ce rôle constitutif ! »* Une position quelque peu provocatrice. Mais qui nourrit un dialogue toujours plus fructueux.

SYLVAIN GUILBAUD

LA PHYSIQUE DANS 30 ANS…

JEAN-MARC ZAORSKI/GAMMA-RAPHO

Jean-Marc Lévy-Leblond, physicien et épistémologue, professeur émérite de l'université Côte d'Azur

Deux choses me semblent remarquables quant à l'avenir de la physique. D'abord, la physique contemporaine repose sur deux piliers extrêmement solides, la mécanique quantique et la relativité générale. Certes, leur articulation pose problème, comme deux pièces d'un puzzle dont on n'a pas encore trouvé la bonne disposition pour les emboîter, mais rien ne prouve que ce soit impossible. Depuis plus d'un siècle, nous n'avons pas pu mettre en évidence de contradiction interne ou de phénomènes observables qui contredisent ces deux théories. C'est très remarquable et, en fin de compte, un peu décevant. Si l'on regarde en arrière, les scientifiques ont mis par exemple moins de cinquante ans pour s'apercevoir que la théorie de l'électromagnétisme classique de Maxwell n'était qu'une approximation. Or, aujourd'hui, rien de tel ne semble se passer.

Le second aspect que j'aperçois concerne les moyens d'observation et d'expérimentation. Avec le LHC, le plus grand accélérateur de particules au monde au Cern, sous la frontière franco-suisse, ou encore avec le télescope spatial James-Webb, n'a-t-on pas atteint les limites de coûts socialement admissibles ? Les physiciennes et physiciens ont bien sûr des projets, par exemple de nouveaux accélérateurs dans les décennies futures, mais pourront-ils être financés ? Pour ces deux raisons, il se peut que la physique fondamentale reste dans un état de suspension théorique, de stagnation, pendant un laps de temps indéterminé… Bien sûr, du jour au lendemain, une expérience pourrait changer la donne, une nouvelle théorie, plus performante, pourrait émerger. Il ne faut pas imaginer que les physiciens pleureraient alors la mécanique quantique et la relativité générale. Ils seraient fous de joie !

PROPOS RECUEILLIS PAR S. G.

La réalité dévoilée par la seule force de la pensée

Gravitation universelle, relativité générale, mécanique quantique… Depuis l'Antiquité, les physiciens ont jeté les bases de théories magistrales par la seule puissance de leur imagination.

Réaliser une expérience sans aucun matériel, en utilisant les seules ressources de son cerveau… C'est possible en physique, et cela s'appelle une expérience de pensée. *« C'est faire violence au sens commun, à ce que l'on connaît autour de nous*, souligne Thibault Damour, physicien théoricien et professeur à l'Institut des hautes études scientifiques. *Une bonne expérience de pensée doit interpeller, faire voir sous un nouveau jour des choses déjà présentes dans les équations mathématiques, ou révéler un paradoxe qui défie les lois établies. »* Dès l'Antiquité, certains Grecs, dont l'astronome Ptolémée, observant le mouvement du Soleil et des astres ainsi que le cycle des saisons, ont ainsi imaginé que la Terre tourne sur elle-même et autour du Soleil. Mais il leur a paru inconcevable qu'un oiseau puisse retrouver son nid, ou de ne pas sentir le souffle de l'air issu d'un déplacement…

Galilée et Newton se livreront eux-mêmes à cet exercice, qui connaîtra son âge d'or au XXe siècle. *« Einstein a conçu beaucoup d'expériences de pensée »*, note Thibault Damour. La plupart de ces expériences « virtuelles » seront vérifiées matériellement. D'autres, comme le démon de Maxwell, stimulent toujours l'imagination des physiciens.

OPALE PHOTO

« UNE BONNE EXPÉRIENCE DE PENSÉE DOIT FAIRE VOIR SOUS UN NOUVEAU JOUR DES CHOSES DÉJÀ PRÉSENTES DANS LES ÉQUATIONS, OU RÉVÉLER UN PARADOXE QUI DÉFIE LES LOIS ÉTABLIES »

Thibault Damour, physicien théoricien et professeur à l'Institut des hautes études scientifiques

Le bateau de Galilée

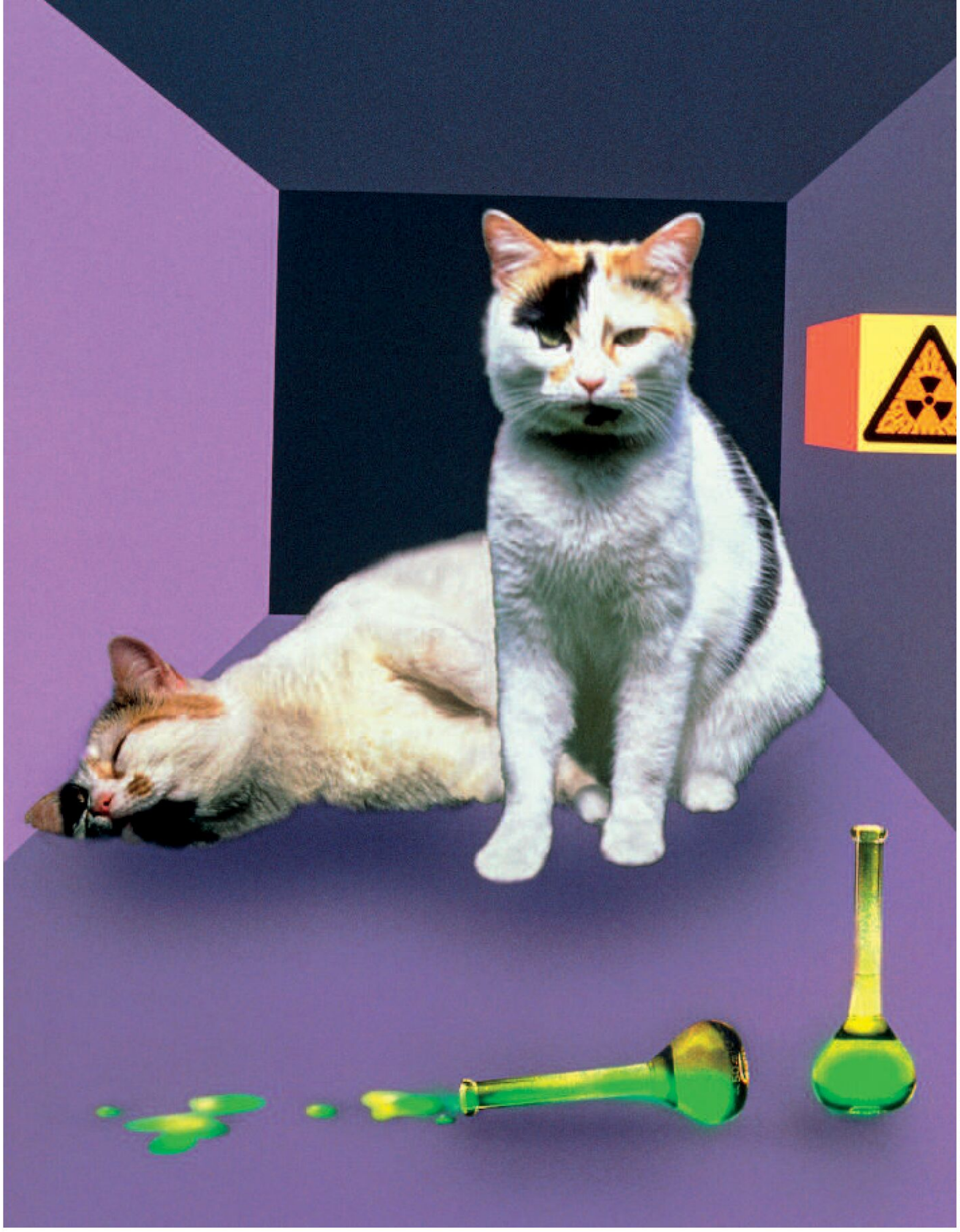
Dans son *Dialogue sur les deux plus grands systèmes du monde*, Galilée (1564-1642) invite son lecteur à s'imaginer dans un bateau immobile, entouré de mouches et de papillons qui volent en tous sens, d'un poisson qui nage dans son bocal, ou encore d'une bouteille qui goutte vers le sol… Puis le bateau se met en mouvement uniforme (sans accélération) : le lecteur constate que les insectes volent de la même manière, le poisson nage de même, les gouttes tombent toujours verticalement. Impossible de dire que le bateau est en mouvement si l'on ne regarde pas par le hublot, si l'on n'a pas de *repère*. *« Le mouvement est comme rien »,* résume audacieusement Galilée, qui vient d'inventer… la relativité.

Le canon de Newton

Cinquante ans après Galilée, l'Anglais Isaac Newton (1642-1727) imagine un boulet de canon tiré depuis le sommet d'une montagne. La gravité terrestre s'oppose à la force d'inertie du boulet et courbe la trajectoire de celui-ci, qui retombe. Si le boulet est projeté avec davantage de vitesse, il tombe plus loin. Newton imagine qu'à très grande vitesse, le boulet pourrait se mettre à tourner autour de la Terre sans jamais retomber. Il observe la Lune et comprend que celle-ci se comporte comme le boulet de canon : elle est en chute perpétuelle vers la Terre. L'Anglais vient de jeter les bases de la gravitation universelle. Ce qui lui vaudra beaucoup plus tard les mots admiratifs du poète Paul Valéry : *« Il fallait être Newton pour remarquer que la Lune tombe quand tout le monde voit qu'elle ne tombe pas. »*

Le démon de Maxwell

Au XIXe siècle, les physiciens étudient les échanges thermiques entre les corps. Le deuxième principe de la thermodynamique, énoncé en 1824, stipule ainsi que le chaud va toujours vers le froid, de manière irréversible. Le physicien écossais James Clerk Maxwell (1831-1879) considère pourtant qu'au niveau microscopique, on pourrait parfaitement voir des particules d'un gaz emprunter le chemin inverse. Il imagine pour cela une expérience qui repose sur une boîte séparée en deux compartiments contenant du gaz. Entre les deux, une cloison percée d'un orifice. Celui-ci est contrôlé par une créature intelligente, le « démon », capable de mesurer la vitesse des molécules du gaz – chaleur et vitesse étant proportionnelles. Il fait passer les plus rapides dans le compartiment de gauche, et les plus lentes dans celui de droite. Au final, le compartiment de gauche s'est réchauffé, celui de droite s'est refroidi, et l'ordre dans chaque compartiment a augmenté… ce qui est contraire au deuxième principe de la thermodynamique où c'est le désordre (ou « entropie ») qui augmente. Il faudra attendre 1949 pour qu'un physicien, le Franco-Américain Léon Bril-



M. KULIK/SCIENCE PHOTO LIBRARY/SUCRÉ SALÉ

louin, démonte l'expérience de Maxwell avec un argument qui semble imparable : pour acquérir l'information sur la vitesse des particules du gaz et opérer son tri, le démon lui-même utilise de l'énergie, qui doit être prise en compte. Le deuxième principe est sauf. Mais le démon de Maxwell stimule toujours la recherche. Les physiciens Stephen Hawking et Jacob Bekenstein ont en effet découvert qu'un trou noir, censé n'émettre aucune lumière, rayonne faiblement. S'agit-il d'une violation du second principe de la thermodynamique ? La question reste ouverte.

Le chat de Schrödinger

La plus populaire des expériences de pensée est à mettre au crédit du physicien autrichien Erwin Schrödinger, qui l'imagine en 1935 à la suite de ses conversations avec Albert Einstein. Les deux hommes n'acceptent pas la thèse des physiciens de « l'école de Copenhague », menés par Niels Bohr, qui soutiennent qu'en physique quantique, un objet peut se trouver dans plusieurs états différents superposés, et que c'est la mesure qui confère à l'objet un état donné. Pour critiquer cette approche probabiliste, Schrödinger imagine de placer un chat dans une boîte fermée qui contient également un élément radioactif et un compteur mesurant la radioactivité, relié à une fiole de poison. Si l'élément radioactif se désintègre, la fiole de poison se brise et le chat meurt. Or, d'après Bohr et ses collègues, le chat serait dans deux états superposés – mort et vivant – jusqu'à ce qu'on ouvre la boîte ! Les travaux menés notamment par Alain Aspect *(lire p. 29)* confirmeront l'interprétation de Copenhague.

En imaginant son chat, et en se demandant s'il peut être à la fois mort et vivant, Schrödinger pensait – à tort – réfuter le caractère probabiliste de la physique quantique. Il ne soupçonnait pas que l'animal allait devenir une icône de la culture populaire !

L'ascenseur d'Einstein

En 1907, Albert Einstein a *« la plus heureuse idée de [s]a vie. »* Il réalise qu'un individu en chute libre ne sentirait plus son propre poids, comme si la force de pesanteur qui pourtant l'attire vers la Terre, s'annulait. Il imagine alors un observateur dans un ascenseur sans fenêtre. Selon Einstein, l'individu ne peut dire si l'ascenseur est au sol, immobile dans le champ de gravité terrestre, ou s'il est dans le vide spatial, tiré vers le haut par un moteur qui applique à l'ascenseur une accélération constante. Conclusion : un champ de gravité ou une accélération ont le même effet sur n'importe quelle expérience, qu'elle concerne des corps physiques ou la lumière. Ce « principe d'équivalence » implique que la masse inertielle (résistance opposée par un corps à une force) et la masse gravifique (liée à la gravité) sont équivalentes. Conséquence, déjà constatée par Galilée et Newton : dans le vide, deux corps chutent de manière identique quelle que soit leur masse. La vérification du principe d'équivalence sera notamment effectuée avec une extrême précision dans l'espace par la mission française Microscope, dont les résultats publiés en 2020 montrent que deux masses identiques chutent de la même manière… au million de milliardième près ! Les physiciens n'ont cependant pas renoncé à débusquer une violation de ce principe, qui signifierait l'existence de minuscules dimensions cachées et permettrait peut-être d'accorder la relativité générale et la mécanique quantique. **JEAN-FRANÇOIS HAÏT**

Les congrès Solvay ou l'internationale des génies

Einstein, Planck, Langevin, Bohr… Les plus talentueux des physiciens européens ont participé à ces conférences créées par un industriel belge en 1911, en un brassage d'idées incroyablement fertile.

La photo est historique. En octobre 1927, à Bruxelles, vingt-neuf scientifiques posent pour la postérité. Leur liste donne le tournis : Einstein, Langevin, Planck, Bohr, Dirac, Heisenberg… et une seule femme : Marie Curie. Tous ont publié des travaux de physique d'une importance capitale, qui ont bénéficié de l'extraordinaire émulation des « conseils Solvay » organisés depuis 1911… Et pas moins de dix-sept recevront le prix Nobel. L'industriel belge Ernest Solvay a fait fortune dans la chimie. *« Autodidacte, il est passionné par les sciences, au point d'échafauder ses propres théories,* raconte Franklin Lambert, professeur émérite de physique mathématique à l'Université libre de Bruxelles. *Toutefois, conscient de son manque de connaissances fondamentales, il envoie à l'Académie des sciences des mémoires de manière anonyme, sous pli scellé. Il demande même son aide à Marie Curie. Surtout, il souhaite soutenir les travaux des physiciens de profession. »* Pour cela, il va octroyer généreusement des crédits, finançant les travaux de chercheurs dont six recevront un prix Nobel. Mais par le fruit du hasard, il ira plus loin.

Tout commence lorsqu'en 1911, il est sollicité par le physicien et chimiste allemand Walther Nernst qui, troublé par certains de ses résultats expérimentaux, souhaite confronter ses travaux à ceux de ses pairs, notamment Einstein, qui a travaillé sur son objet d'étude. *« Au contraire des chimistes, les physiciens étaient alors peu organisés au plan international,* souligne Franklin Lambert. *Une rencontre avait été organisée à Paris en 1900, au moment de l'Exposition universelle, mais elle était restée sans suite. »* Solvay accède à la demande de Nernst : il crée un « conseil » d'une vingtaine de scientifiques, présidé par le physicien néerlandais Hendrik Lorentz. Cette réunion privée,

DARCHIVIO/OPALE.PHOTO

Le brillantissime congrès Solvay de 1927.
De gauche à droite, au troisième rang : Auguste Piccard, Émile Henriot, Paul Ehrenfest, Édouard Herzen, Théophile de Donder, Erwin Schrödinger, Jules-Émile Verschaffelt, Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg, Ralph H. Fowler, Léon Brillouin. *Au deuxième rang :* Peter Debye, Martin Knudsen, William Lawrence Bragg, Hendrik Anthony Kramers, Paul Dirac, Arthur Compton, Louis de Broglie, Max Born, Niels Bohr. *Au premier rang :* Irving Langmuir, Max Planck, Marie Curie, Hendrik Lorentz, Albert Einstein, Paul Langevin, Charles-Eugène Guye, Charles Thomson Rees Wilson, Owen Willans Richardson.

accessible seulement sur invitation, réunit un petit nombre de scientifiques de premier plan. Elle est organisée avec beaucoup de diplomatie car les tensions entre la France et l'Allemagne sont déjà palpables. Solvay invite Français et Britanniques en nombre et choisit Bruxelles, terrain neutre. Polyglotte, Lorentz se chargera de la traduction et résumera les interventions de chacun, tandis que le Français Maurice de Broglie transcrira les débats.

Comme cela deviendra la règle, le conseil porte sur un thème précis, en l'occurence la théorie cinétique, qui explique la température et la pression d'un gaz par le mouvement des particules qui le composent. *« La physique est alors en crise,* poursuit l'historien belge. *L'hypothèse des quanta* (lire p. 26-31) *remet-elle en cause cette théorie cinétique, et plus globalement toute la physique, ou peut-on l'intégrer au cadre général? Au sortir de ce premier conseil, la question n'est pas tranchée. Mais de retour à Paris, l'un des participants, le physicien et mathématicien Henri Poincaré, publie un article démontrant que l'hypothèse quantique est incontournable. »* La révolution quantique vient de commencer…

Le deuxième conseil, en 1913, donnera lui aussi lieu à une confrontation de haute volée : le Néo-Zélandais Ernest Rutherford (1871-1937) y expose son modèle novateur de l'atome, constitué, selon lui, d'un noyau contenant les charges positives autour duquel tournent les électrons chargés négativement. Ceci, contre l'avis de Joseph John Thomson (1856-1940), découvreur de l'électron et… son ancien professeur ! Ce dernier voit l'atome comme un « pudding », une pâte de matière positive dans lequel se déplacent les électrons… *(lire p. 37).*

Théâtre de célèbres controverses, les conseils sont aussi l'occasion de tisser des liens, de mettre en place des réseaux. Une communauté des physiciens se constitue. Elle survivra à la Première Guerre mondiale, même si les Allemands ne seront de retour à Bruxelles qu'en 1927. Cette édition porte sur le thème « électrons et photons ». *« Elle a été très fertile. Car c'est notamment grâce aux objections stimulantes d'Einstein que le physicien allemand Werner Heisenberg a pu établir sa relation d'incertitude »,* souligne Franklin Lambert. Celle-ci stipule qu'à l'échelle microscopique, on ne peut mesurer avec précision à la fois la posi- ◆◆◆

MR. CLOVIS NEVES/AIP

« AU CONSEIL DE 1927, C'EST EN PARTIE GRÂCE AUX OBJECTIONS STIMULANTES D'EINSTEIN QUE HEISENBERG ÉTABLIT SA RELATION D'INCERTITUDE »

Franklin Lambert, professeur émérite de physique

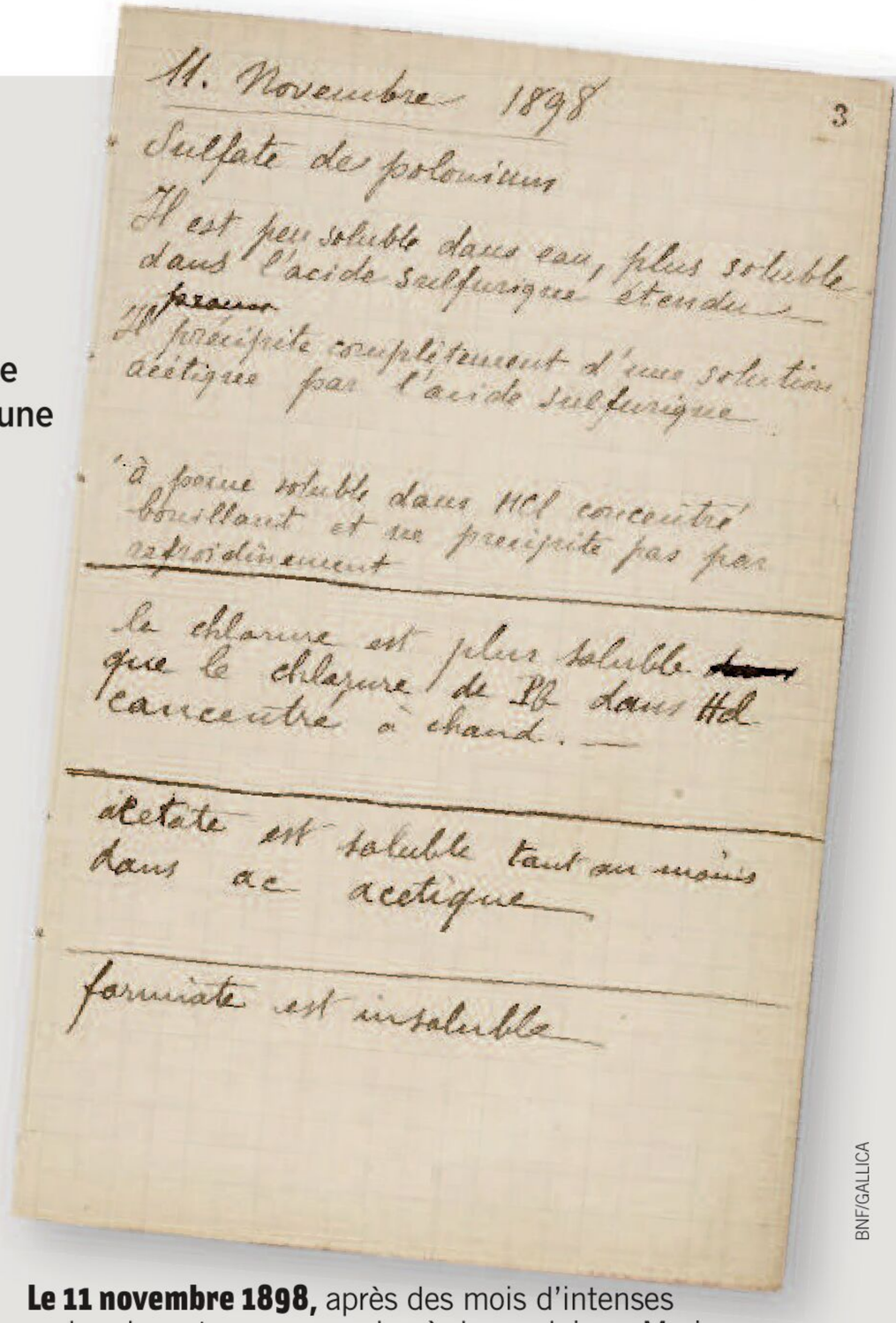
◆◆◆ tion et la vitesse d'une particule.
Le conseil de 1927 sera aussi le théâtre d'une confrontation dantesque, appelée à durer des années, entre Albert Einstein et le physicien danois Niels Bohr. Au cœur de la discorde: ce fameux principe d'incertitude qui donne un caractère « statistique » aux objets quantiques. Einstein ne remet pas en cause la théorie quantique, mais pense qu'il existe des lois permettant de décrire toutes les propriétés de chaque objet. Bohr soutient que de telles lois ne sont pas nécessaires. *« Les témoignages de Heisenberg, Ehrenfest et Bohr, publiés dans les années 1960, rendent compte de discussions très vives,* précise Franklin Lambert. *Beaucoup ont eu lieu de manière informelle, à l'hôtel, le matin ou le soir! L'histoire donnera tort à Einstein.... »*
Après l'atome, les physiciens s'attaquent à l'étude de son noyau. En 1932, le Britannique James Chadwick découvre un de ses composants, le neutron. Le conseil de 1933 porte notamment sur la nature de celui-ci. Son caractère neutre fait qu'il peut être utilisé comme projectile sur d'autres atomes, dont il fait éclater les noyaux avec une importante émission d'énergie. C'est la fission, qui sera bientôt mise en œuvre dans tous les réacteurs nucléaires. Cette même année, trois femmes ayant joué un rôle majeur dans la physique nucléaire sont présentes à Bruxelles: Marie Curie, sa fille Irène Joliot-Curie (qui découvrira la radioactivité artificielle avec son époux Frédéric), et l'Autrichienne Lise Meitner (1878-1968), oubliée du prix Nobel malgré l'importance de ses travaux – elle découvrira la fission avec le chimiste allemand Otto Hahn, sans être associée à cette découverte car en 1938, une chercheuse juive ne pouvait publier ses travaux dans une revue allemande.
De fait, dès 1933, avec la montée du nazisme en Allemagne, les nuages s'amoncellent sur l'Europe et les conseils Solvay. Le Français Paul Langevin, qui a pris la suite de Lorentz, ne peut réunir celui de 1936 pour raisons de santé. Trois ans plus tard, un conseil consacré à la physique nucléaire, et auquel des physiciens américains étaient invités, n'aura pas lieu non plus. La guerre éclate, les Américains s'engagent dans le projet Manhattan *(lire*

Franklin Lambert et Frits Berends, *Vous avez dit : sabbat de sorcières ? La singulière histoire des premiers conseils Solvay*, éditions EDP sciences, 2019

Dans les petits papiers de Marie Curie

Au jour le jour, Marie Curie consignait ses travaux dans des carnets de moleskine. Dans ces indispensables outils de laboratoire se lit toute une vie de réflexions et de découvertes, jusqu'au moindre détail.

Les trois carnets de laboratoire que Pierre et Marie Curie ont remplis entre décembre 1897 et août 1900, durant leur découverte des éléments que Marie appellera « radioactifs », sont une mine de renseignements sur leurs méthodes. Tout y est rapporté: le poids des minerais utilisés, le résultat des mesures, et même les conditions de travail… Ainsi, le 6 février 1898, Marie Curie note d'une écriture fine mais rageuse la température de l'air: 6,25 °C! Il devait être parfois pénible de se concentrer dans le petit local prêté par le directeur de l'École municipale de physique et chimie de Paris! La double Prix Nobel a utilisé des petits cahiers de 11 centimètres sur 17, dont la couverture noire contient 156 pages à petits carreaux.
Elle y consigne le moindre détail de son écriture *« claire et nette, qui dénote un esprit réfléchi, prudent […], une persévérance dans l'effort »*, selon l'étude graphologique publiée le 9 janvier 1911 par le quotidien *Excelsior*.
Chaque note est succincte: date, nom du minerai suivi de la mesure effectuée, avec parfois une précision sur le temps qu'il fait: *« Il a plu hier soir »*, indice pouvant expliquer la mesure. Marie y détaille aussi ses tentatives pour apprivoiser les nouvelles techniques. Ainsi, pendant dix jours, s'exerce-t-elle à manier le


11. Novembre 1898 3
Sulfate de polonium
Il est peu soluble dans eau, plus soluble dans l'acide sulfurique étendu
précipité
Il précipite complètement d'une solution acétique par l'acide sulfurique
Il forme soluble dans HCl concentré bouillant et ne précipite pas par refroidissement
Le chlorure est plus soluble que le chlorure de Ba dans HCl concentré à chaud.
Acétate est soluble tant au moins dans ac acétique
Formiate est insoluble

BNF/GALLICA

Le 11 novembre 1898, après des mois d'intenses recherches et une pause due à des malaises, Marie Curie et son mari Pierre entament le troisième de leurs « carnets de la découverte » du radium et du polonium.

SPL/SUCRÉ SALÉ

p. 32-33), alors que leurs collègues allemands – Heisenberg à leur tête – se mettent au service du Troisième Reich. On connaît la suite. Dès 1948, les conseils reprennent, mais l'âge d'or est passé. *« Le centre de gravité de la recherche en physique s'est déplacé vers les États-Unis »*, souligne Franklin Lambert.

Depuis, les conseils, auréolés de leur prestige, n'ont jamais cessé. Toujours en comité restreint, ils se déroulent selon un schéma triennal : physique la première année, chimie la troisième, avec une année blanche entre les deux. *« En tant que jeune chercheur invité, en 1991, j'ai eu l'occasion d'y rencontrer les pointures du domaine »*, se souvient le physicien Jean Dalibard. *« Les conseils Solvay ne jouent probablemewnt plus un rôle aussi important qu'au début du XXe siècle, mais ils apportent un regard différent, et souvent avec plus de recul sur un domaine donné »*, souligne Antoine Browaeys, chercheur à l'Institut d'optique à l'université de Paris-Saclay.

Le choix de la thématique reflète l'air du temps : l'édition 2022 était consacrée à « la physique de l'information quantique ». *« C'est une nouvelle manière de regarder des problèmes tels que la matière condensée, la physique des hautes énergies et la cosmologie. Les débats ont porté aussi bien sur les trous noirs que les ordinateurs quantiques »*, précise le physicien. Quelques mois plus tard, le prix Nobel était décerné à trois physiciens à la pointe de l'information quantique : l'Américain John Clauser, l'Autrichien Anton Zeilinger… et le Français Alain Aspect.

JEAN-FRANÇOIS HAÏT

Le congrès de 1927 voit Niels Bohr et Albert Einstein s'affronter de manière théâtrale sur une question cruciale : pourra-t-on parvenir à définir à la fois la position et la vitesse d'une particule ? Les discussions entre les deux hommes se poursuivront des années, de façon souvent informelle.

Carnets consultables sur le site de la Bibliothèque nationale de France, https://sciav.fr/carnetscurie

Soraya Boudia, *Marie Curie et son laboratoire*, Archives contemporaines, 2001

Marie Curie, *Pierre Curie*, Odile Jacob, 2022. On y trouve, en fin d'ouvrage, une étude des carnets de laboratoire écrite par Irène Joliot-Curie.

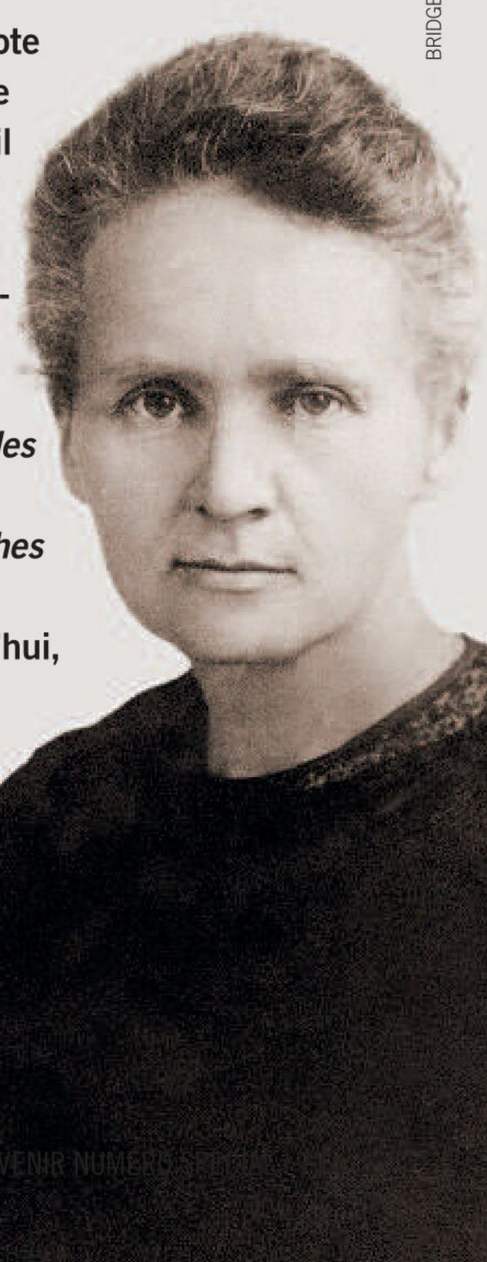
« quartz piézo-électrique », un instrument inventé par Pierre et son frère Jacques, capable d'engendrer une quantité connue de charge électrique.

Le 17 février 1898, Pierre et Marie commencent à étudier la pechblende, un minerai d'uranium extrait des mines d'argent de Bohême. Ils notent les mesures de courant produit par ce minerai radioactif et le comparent à celui engendré par l'uranium seul. Alors que celui-ci est déjà très actif, la pechblende le surpasse ! Marie et Pierre vont recommencer leurs mesures, puis vérifier leur appareillage pendant plusieurs jours tant ce résultat leur semble improbable. Contiendrait-elle un élément plus actif que l'uranium ? Après cinq mois pendant lesquels ils tentent de l'isoler, Pierre le nomme enfin dans leur deuxième carnet, le 4 juillet 1898 : polonium (Po)… *« en hommage au pays d'origine de l'un d'entre nous »*, écriront-ils dans l'article qu'ils publieront deux semaines plus tard dans les *Comptes rendus de l'Académie des sciences*. Souffrant d'une fatigue inexplicable et de malaises, selon l'Anglais Robert Reid de l'université de Cambridge, ils ne reprennent leurs travaux que le 11 novembre et publient leur découverte du radium le 26 décembre.

Les rapports avec l'industrie se décèlent aussi dans les carnets. On lit en effet à la date du 23 décembre 1900 : *«* Fractionnement, Haudepin, 250 kg *»*, du nom de Frédéric Haudepin, chimiste de la Société centrale des produits chimiques (SCPC) avec qui le couple avait conclu un accord : la SCPC leur fournissait les minerais, tandis qu'ils lui cédaient une partie des substances radioactives qu'ils isolaient et que la SCPC commercialisait : radium pour les réveils, peintures luminescentes, cosmétiques ou radiothérapie. Mais ces pages noircies de notes ne contiennent pas uniquement le récit du quotidien des deux chercheurs… Le polonium et le radium sont des éléments si radioactifs qu'ils y ont laissé des traces. À tel point que Frédéric Joliot, gendre de Pierre et de Marie, informa l'Académie des sciences qu'ils étaient contaminés. Cependant, il note que le danger a été assez vite compris. En 1931, en effet, il effectue des tests à l'Institut du radium avec sa femme, Irène Joliot-Curie, et sa belle-mère Marie. *« Pour des quantités de radium cinq à dix fois plus grandes que celles que manipulaient Pierre et Marie Curie, l'activité des fiches de 1931 est environ dix fois moindre »*, note-t-il. Aujourd'hui, les chercheurs remplissent toujours des carnets de laboratoire, mais ces derniers ne peuvent être contaminés que par des… virus informatiques.

JACQUES-OLIVIER BARUCH

Marie Curie verra sa santé se détériorer à cause du radium qu'elle manipule, et qui contamine également ses carnets.



BRIDGEMAN IMAGES

GILBERT UZAN/GAMMA RAPHO

Errare scientificum est ou les faux pas de la science

Calorique, rayons N, éther ou fluide boréal expliquant les aurores polaires… L'histoire des sciences est pavée de théories qui ont connu un certain succès avant de tomber aux oubliettes. Autant d'impasses qui gagneraient pourtant à être davantage étudiées… pour savoir ce qu'il ne faut pas faire.

La science n'est pas un long fleuve tranquille. Son cheminement est au contraire sinueux, chaotique, conflictuel. Périodiquement, de nouvelles théories surgissent, séduisent plus ou moins… et ne passent pas l'hiver. Parfois, celles qui faisaient consensus butent sur des phénomènes qu'elles sont incapables d'expliquer, et finissent par être remplacées.

Que deviennent-elles ? *« Les anciennes théories restent utiles*, note l'historien des sciences Olivier Darrigol, de l'université Paris-Cité. *Certaines survivent notamment parce qu'elles permettent des calculs plus simples que celles qui leur ont succédé. En avionique, par exemple, la mécanique classique de Newton est parfaitement efficace. »*

Autre exemple : on a longtemps expliqué les échanges thermiques par la circulation d'un fluide appelé calorique. *« C'est le physicien écossais Joseph Black (1728-1799) qui propose cette théorie impliquant un fluide s'écoulant des corps chauds vers les corps froids »*, raconte Jean-Marc Ginoux, qui enseigne l'histoire des sciences à l'École centrale. Aujourd'hui, on explique la chaleur par le mouvement, à l'échelle de l'atome, mais si un chauffagiste voit la chaleur comme un fluide, a-t-il tout faux ?

« En science, il y a "faux" et "faux", assure Olivier Darrigol. *Jean-Marc Lévy-Leblond a publié en 1980 un bel article titré "Éloge des théories fausses", lesquelles, selon lui, devraient être enseignées afin que les étudiants apprennent à les réfuter. »* Pour le grand physicien, *« l'histoire traditionnelle des sciences et de leur succès est celle de la seule partie émergée d'un iceberg, qui ne flotterait pas s'il n'était soutenu par un volume beaucoup plus*

Jacques Benveniste, fervent promoteur de sa théorie erronée sur la mémoire de l'eau, aurait-il été victime de « l'effet maître » : des collaborateurs un peu trop enclins à aller dans son sens ?

UNIVERSITY OF COPENHAGEN

« LES ANCIENNES THÉORIES RESTENT UTILES. CERTAINES SURVIVENT PARCE QU'ELLES PERMETTENT DES CALCULS PLUS SIMPLES QUE CELLES QUI LEUR ONT SUCCÉDÉ»

Olivier Darrigol, historien des sciences, université Paris-Cité

grand d'échecs et d'erreurs ». Il ajoute : « *Maîtriser un concept scientifique, c'est connaître les limites de sa validité, donc reconnaître les situations où il n'opère pas.* »

Jean-Marc Lévy-Leblond propose dans cet article une « *typologie sommaire des théories fausses* » : « *Par ordre de distance croissante à la vérité reçue, on peut distinguer des théories adhérentes, différentes, aberrantes et sidérantes.* » Le calorique entre dans la première catégorie, celle des théories adhérentes, que le chercheur définit comme « *les théories fausses aujourd'hui qui furent vraies hier et restent souvent d'excellentes approximations* ». Toutes sortes de « fluides » ont ainsi été imaginés au cours de l'histoire des sciences. « *Pendant une vingtaine d'années*, indique Olivier Darrigol, *Pierre-Simon de Laplace (1749-1827) a interprété toute la physique en termes de fluides : chaleur, lumière, électricité, fluides boréal et austral expliquant les aurores du même nom…* »

L'éther, tour à tour indispensable et inutile

À une autre époque, ce fut aux « rayons » d'avoir la cote. Wilhelm Röntgen découvre les rayons X en 1895, Paul Villard, les rayons gamma en 1900… Dans la foulée, le physicien français René Blondlot (1849-1930) « découvre » en 1903 les « rayons N », qui amplifieraient la luminosité d'une source de faible intensité. Mais personne ne peut les reproduire… Ils sont vite oubliés. Quant à l'éther, fluide parfois et parfois non, d'Aristote à Einstein en passant par Descartes, il a connu de nombreuses déclinaisons. « *En 1905, Einstein estime qu'il est superflu* », raconte Jean-Marc Ginoux. Mais le 5 mai 1920, à la conférence de Leyde, il est formel : « *Selon la théorie de la relativité générale, un espace sans éther est inconcevable.* » Bien sûr, il s'agit d'un « nouvel éther » : « *L'éther de la théorie de la relativité générale,* précise-t-il, *est un milieu privé de toutes les propriétés mécaniques et cinématiques, mais qui détermine les phénomènes mécaniques (et électromagnétiques).* » Aujourd'hui, la mécanique quantique attribue au vide des propriétés qui font penser… à une nouvelle variété d'éther. « *On a besoin, à un moment donné, d'inventer un agent qui explique les phénomènes observés,* souligne le physicien. *Tout comme le calorique, l'éther a été un marchepied sur le chemin de la compréhension.* »

Qui a dit : « *La science, mon garçon, est faite d'erreurs, mais d'erreurs qu'il est bon de commettre car elles mènent peu à peu à la vérité* » ? « *C'est le professeur Lidenbrock, dans le* Voyage au centre de la Terre *de Jules Verne,* rappelle Denis Machon, chercheur à l'université Claude-Bernard à Lyon. *N'oublions pas que les chercheurs sont des êtres*

Jean-Marc Ginoux, *Hasard et erreur dans les grandes découvertes scientifiques*, Ellipses, 2022

Denis Machon, *Les bavures scientifiques. Quand des scientifiques se prennent les pieds dans la démarche,* Book-e-book, 2015

Alexandre Moatti, *Alterscience. Postures, dogmes, idéologies,* Odile Jacob, 2013

Jean-Marc Lévy-Leblond, « Éloge des théories fausses », *European Journal of Physics,* 1980

Mémoire de tricheurs

La science a aussi ses imposteurs. Peu nombreux, ils provoquent tout de même des remous dans la communauté. Jan Hendrik Schön (né en 1970) est un cas spectaculaire. En 2001, ce chercheur allemand de l'université de Constance annonce dans *Nature* qu'il a réussi à réaliser un transistor à l'échelle moléculaire. Un coup de tonnerre pour toute la filière de production de puces gravées sur silicium… Il est d'ailleurs récompensé par de nombreux prix. Mais peu après, un chercheur de l'université de Princeton signale à *Nature* une anomalie qui fait penser à un « copier-coller ». Puis les découvertes de données dupliquées se multiplient, le doute devient soupçon et une commission d'enquête est formée. Son rapport, en 2002, détaille seize filouteries démontrables et quelques autres probables. L'intéressé se défend, se débat, avoue partiellement. Il est finalement sanctionné pour « conduite déshonorante » en 2004.

Le cas de Emil Rupp (1898-1979) est un peu différent. Ce physicien allemand publie en 1926 plusieurs articles sur les propriétés d'interférence des rayons émis par des sources particulières (appelées rayons canaux), qui corroborent les travaux d'Einstein sur la dualité onde-particule. Mais en 1935, il doit admettre qu'il a fabriqué des résultats. « *Il est clair qu'il a triché*, estime Olivier Darrigol, *même si ce n'est pas certain pour tous ses articles. Dans son cas, on peut supposer une association d'erreurs, de malhonnêteté et de délire.* » Des suspicions de triche plus ou moins étayées visent même des monuments de la science. Ptolémée aurait emprunté à autrui, sans le dire, des mesures vieilles de trois cents ans. Galilée aurait fait passer des « expériences de pensée » sur la chute des corps pour des expériences tout court. Et Blaise Pascal a-t-il vraiment réalisé toutes les expériences qu'il rapporte, ou juste imaginé certaines d'entre elles ?

◆◆◆ *humains comme tout le monde. La démarche scientifique, cela s'apprend.* » Et suppose parfois de lutter contre des penchants bien naturels.
Toutes sortes de mécanismes psychologiques peuvent ainsi faire dévier le physicien. Il peut se laisser emporter par l'élégance d'une idée. « *On a souvent été séduit par la symétrie, la régularité, les séries*, indique Denis Machon. *Parfois, ça marche : voyez le tableau de Mendeleïev.* » Le problème est de vouloir à tout prix démontrer une régularité au point de devenir aveugle aux signaux qui la contredisent. Le chercheur cite Isaac Asimov : « *La phrase la plus excitante à entendre en science, celle qui annonce de nouvelles découvertes, n'est pas "Eurêka" (j'ai trouvé !), mais plutôt "Tiens, c'est marrant…".* »

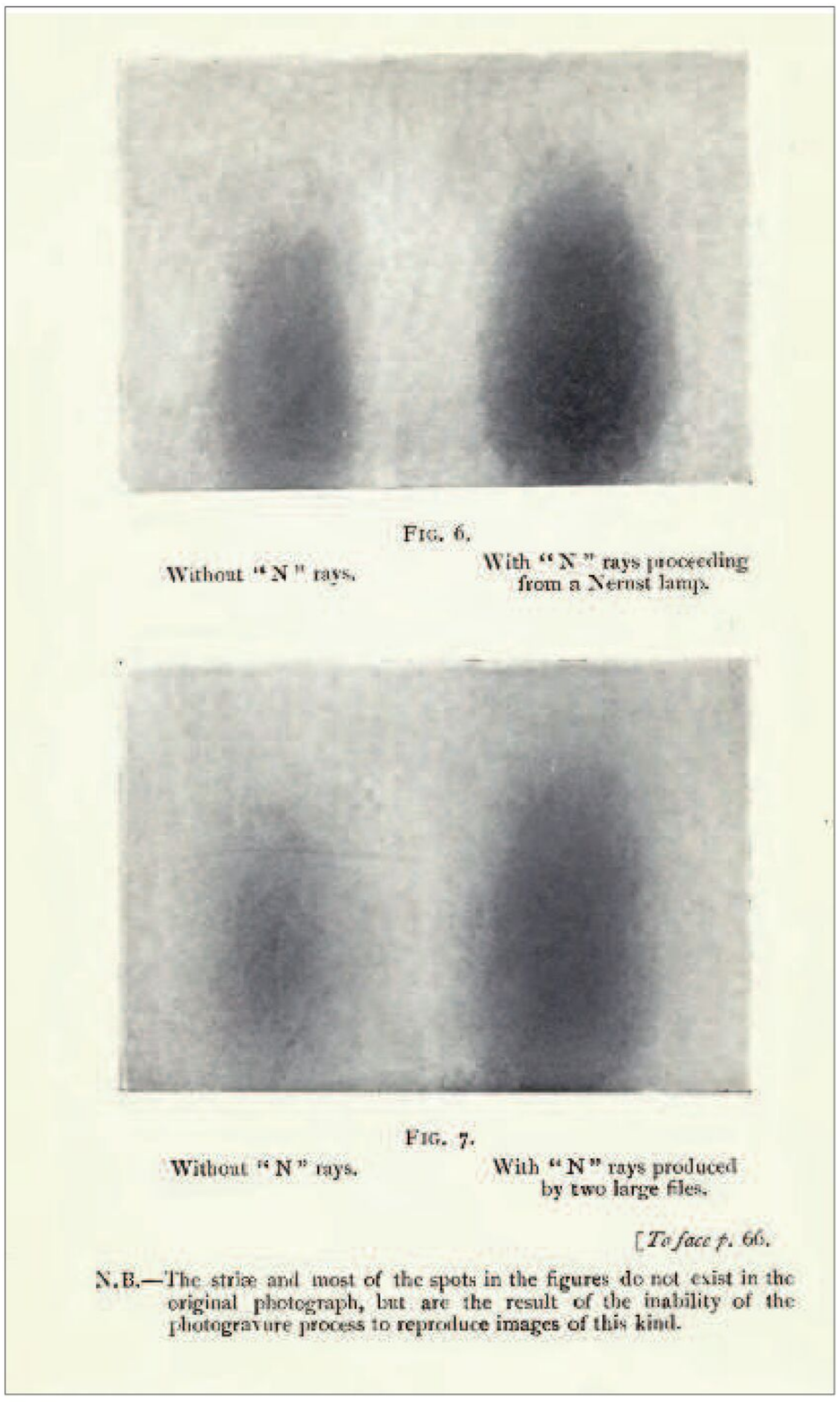


FIG. 6.

Without "N" rays. With "N" rays proceeding from a Nernst lamp.

FIG. 7.

Without "N" rays. With "N" rays produced by two large files.

[*To face p.* 66.

N.B.—The striæ and most of the spots in the figures do not exist in the original photograph, but are the result of the inability of the photogravure process to reproduce images of this kind.

DOMAINE PUBLIC

Besoin d'être reconnu, publié… et de crédits !

Pourtant… « *Jacques Benveniste (1935-2004) croyait en sa théorie de la "mémoire de l'eau", alors même qu'elle avait été infirmée par une étude en double aveugle*, rappelle Denis Machon. *Une partie de l'explication se trouve sans doute dans le fait que la personne qui faisait les manip' a pu, consciemment ou non, observer un peu trop souvent des signaux conformes à ce que son patron espérait. C'est ce que l'on peut appeler "l'effet maître", résultant du mandarinat. Une variante de l'argument d'autorité : qui suis-je pour contredire cette belle théorie que mon patron va publier, suggère l'inconscient du manipulateur… À mon avis, c'est le piège dans lequel Benveniste est tombé.* »
Par ailleurs, le scientifique est soumis à de fortes pressions. S'il veut obtenir un poste, des collaborateurs, des équipements… il faut qu'il publie. « *Et le scientifique aime bien être reconnu*, ajoute Denis Machon. *De plus, il est parfois soumis à des ascenseurs émotionnels énormes. Il suffit qu'une manip' en cours donne un résultat prometteur… ou négatif.* » Ou que des crédits soient accordés… ou pas.
Jean-Marc Lévy-Leblond distingue en second lieu les « théories différentes » : « *Des théories qu'on pourrait encore appeler "cohérentes", […] capables de faire face à la plupart des objections, et qui butent en définitive sur une réfutation convaincante mais subtile.* »
Le physicien en donne un superbe exemple avec la théorie de la gravitation de Georges-Louis Le Sage (1724-1803). Celui-ci imaginait l'espace grouillant de corpuscules filant en tous sens, se cognant sur tout ce qui barre leur chemin. « *En vertu de sa symétrie, un corps sphérique isolé voyait se compenser ces actions. Par contre, deux corps faisaient chacun écran à l'autre, et le déficit de collisions subséquent engendrait une force nette sur la face opposée. Autrement dit, pour Le Sage, les corps ne s'attiraient pas mais étaient poussés l'un vers l'autre !* »
Beaucoup moins consistantes sont les « théories aberrantes ». Il s'agit de « *la plupart des propositions des marginaux de la science : le Soleil froid, la Terre creuse […]. Sans parler des dizaines de protestations contre la relativité* ». Jean-Marc Lévy-Leblond note que les erreurs de raisonnement y sont souvent bien dissimulées.
Selon sa typologie, il y a enfin les « théories sidérantes ». « *Ce sont les moins intéressantes scientifiquement, mais des plus importantes socialement, car les plus pernicieuses. Il s'agit de ces textes qui ont l'apparence de la physique, ou des discours qui en font le bruit, mais n'ont aucune signification […].* » Du « yaourt scientifique », en quelque sorte. Une prose enjôleuse qui se pare de mots savants pour faire sérieux et vendre en douce une marchandise frelatée : idéologie, gourous, livres ou conférences, baume au cœur ou… « médecine quantique ».

PIERRE VANDEGINSTE

Les rayons N, « découverts » par le physicien français René Blondlot, étaient selon lui « *une nouvelle espèce de lumière* ». Photogravures supposées les mettre en évidence dans une communication faite à l'Académie des sciences en 1903.

DENIS MACHON

« N'OUBLIONS PAS QUE LES CHERCHEURS SONT DES ÊTRES HUMAINS COMME TOUT LE MONDE. LA DÉMARCHE SCIENTIFIQUE, CELA S'APPREND »

Denis Machon, chercheur à l'université Claude-Bernard à Lyon

CLAUS LUNAU/SCIENCE PHOTO LIBRARY/SUCRÉ SALÉ

Qu'est-ce qui ne tourne pas rond chez les platistes ?

Comment prétendre que la Terre est plate, alors que les Grecs anciens, déjà, la savaient sphérique ? Histoire d'une « infox » récente… à la vie dure.

L'espace et le globe sont des illusions qui n'ont que cinq cents ans et ont été imposées au forceps à l'humanité, sans aucune preuve tangible, défend ce diplômé d'une grande école de commerce. *Lacs, mers et océans du monde sont 100 % plats. La Terre est infiniment plane et ne flotte pas dans le vide de l'espace.* » Comment est-il possible, en 2022, de tenir un tel discours ?

Il y a là plusieurs niveaux de croyances. D'abord, nous avons tous appris à l'école comment, au Moyen Âge, on pensait que la Terre était plate, ou comment Christophe Colomb a démontré sa rotondité en voyageant vers l'ouest pour rejoindre les Indes. « *Idée fausse !* rétorque Sylvie Nony, chercheuse associée à l'université Paris-Cité. *Même les premiers Pères de l'Église n'ont aucun doute sur la sphéricité de la Terre. On trouve de rares détracteurs de cette idée, tel le chrétien Lactance (v. 250-v. 325) qui réfute les antipodes, mais il n'a aucun auditoire. En Occident, il n'y a jamais eu débat. Les traces écrites depuis Platon et Aristote décrivent un monde sphérique.* » Des raisonnements appuyés sur l'attraction des objets par la Terre ou les éclipses de Lune.

« *Voltaire a largement contribué à propager ce mythe*, poursuit la chercheuse. *But inavoué : faire de la Renaissance une période de lumière, opposée au Moyen Âge obscurantiste, et condamner l'Église ; reconstruire l'histoire en attribuant le début de la modernité à Christophe Colomb.* »

Le principe, repris par des historiens comme l'anticlérical Michelet au XIXe siècle, perdure aujourd'hui dans les écoles.

Par ailleurs, la manière de présenter les résultats d'enquêtes sur les croyances prête à confusion. Ainsi, selon une étude de l'Ifop pour Conspiracy Watch, plus de 9 % des Français pourraient croire que la Terre est plate. « *Attention à l'interprétation de ces chiffres*, prévient Sylvie Nony, *sur le même échantillon, 68 % n'avaient jamais entendu parler de cette idée.* » Ils seraient 16 % aux États-Unis, où les associations de platistes sont légion.

Leurs membres procèdent communément à des tests de mesure de la platitude des étendues d'eau. Ils émettent une lumière laser sur le bord d'un lac et l'observent depuis le rivage opposé. « *Ils commettent ici des erreurs épistémologiques*, explique Marie Gueguen, philosophe des sciences à l'université de physique de Rennes 1. *Dire : "si je vois le laser, alors la Terre est plate" est un test au pouvoir de confirmation très léger.* » Il faut tenir compte des variations de la densité de l'air, de sa température, de celle de l'eau, de la réfraction atmosphérique…

La Terre est un disque immobile… Pour en arriver à croire à ce mythe contre toute évidence, il faut de solides motivations.

Alunissage dans les studios de la Nasa

Les réseaux sociaux offrent désormais une tribune démultipliée à ce type de croyance. « *On a connu un effet plafond des thèses complotistes pendant la pandémie* », explique Pascal Wagner-Egger, spécialiste du complotisme à l'université de Fribourg (Suisse). Scepticisme face à la science, souhait de se démarquer de la masse par une sorte de liberté de pensée… La situation particulière du confinement y a largement contribué. « *Si vous croyez que la Terre est plate, alors vous pouvez croire à toutes les autres thèses complotistes.* » Jusqu'à asséner que Stanley Kubrick a mis en scène l'alunissage de 1969 dans des studios que la Nasa utiliserait encore aujourd'hui pour monter les images 3D de la Terre vue du ciel ! **VALÉRIE HANDWEILER**

Des démonstrateurs aux blogueurs, quatre siècles de vulgarisation

La science s'expose, passionne, étonne. Alors qu'au XVIIIe siècle, les démonstrations de physique électrisaient littéralement les aristocrates, les youtubeurs d'aujourd'hui captivent des centaines de milliers d'internautes avec leurs vidéos informées et ludiques.

« Le règne des lettres est passé ; les physiciens remplacent les poètes et les romanciers ; la machine électrique tient lieu d'une pièce de théâtre », constate l'écrivain Louis-Sébastien Mercier dans son *Tableau de Paris* publié en 1781. Le trait n'est guère forcé. Le XVIIIe siècle s'est pris de passion pour la physique. Dans les salons de l'aristocratie et de la bourgeoisie, épicentres de cette première diffusion de la science, l'optique naissante se donne en spectacle grâce à des lanternes magiques, et les machines pneumatiques mettent en scène de façon macabre les effets du vide : des oiseaux sont placés dans des cloches dont on pompe l'oxygène, condamnant les volatiles à un prompt trépas. Dans ce grand show, l'électricité tient le haut de l'affiche avec les bouteilles de Leyde – ancêtres des condensateurs électriques – qui provoquent des commotions chez ceux qui les touchent. L'abbé Nollet (1700-1770), principal artisan de ces démonstrations, électrise le Tout-Paris… et jusqu'à 140 personnes d'un coup à la cour de Versailles : la première a touché la bouteille de Leyde, dont le courant s'est propagé aux autres individus se tenant par la main, toute la chaîne humaine sursautant de concert. Pourquoi un tel attrait ? *« Il tient à l'évolution de la physique,* explique Bernadette Bensaude-Vincent, professeure émérite de philosophie des sciences à l'université Paris 1 Panthéon-Sorbonne. *En devenant expérimentale, elle se développe non seulement dans les académies européennes, mais aussi dans les salons, car les savants ont besoin de mécènes pour financer leurs travaux. »* Ainsi le duc de la Rochefoucauld accueille-t-il dans son château diverses expérimentations, notamment sur le salpêtre.

JEAN VIGNE/KHARBINE-TAPABOR

L'abbé Nollet, ou le plaisir de communiquer son enthousiasme. Ce vulgarisateur hors pair du XVIIIe siècle publia de nombreux ouvrages et réalisa nombre d'expériences, notamment sur l'électricité, devant un public choisi.

L'édition participe du mouvement. Dans les bibliothèques voisinent les *Entretiens sur la pluralité des mondes* de Fontenelle, *Le Newtonianisme pour les dames* d'Algarotti ou encore les *Leçons de physique expérimentale* de l'incontournable abbé Nollet. Posséder un cabinet de physique est aussi de bon ton, ce qui alimente tout un marché d'instruments aux allures d'objets d'art : microscopes, télescopes, appareils d'optique… La science est ainsi le dernier divertissement à la mode, et les cercles lettrés comptent nombre d'amateurs éclairés qui contribuent à la production des connaissances, tel l'ancien capitaine des armées de Picardie Charles de Cisternay du Fay, qui identifie l'existence de deux types d'électricité. Ou d'Émilie du Châtelet, qui livre la première traduction française de l'œuvre de Newton.

« Savants et nobles partagent un vivre-ensemble, note Daniel Raichvarg, professeur émérite en sciences de l'information et de la communication à l'université de Bourgogne. *Les amateurs éclairés sont souvent eux-mêmes membres de l'Académie royale des sciences. »*

AKG-IMAGES

La lanterne magique, dont une séance est représentée ici en papier découpé par le « silhouettiste » français Auguste Édouart vers 1835, fait partie de ces appareils mi-scientifiques, mi-divertissants qui émerveillent les mondains au XVIIIe siècle et se diffusent plus largement au siècle suivant.

Par ailleurs, par leur simple présence, les spectateurs de l'élite jouent un rôle dans la validation des connaissances. *« Pour "faire parler la nature", les physiciens font des montages expérimentaux devant un groupe de personnes triées sur le volet. C'est le début du jugement par les pairs »*, note Bernadette Bensaude-Vincent, évoquant une expérience fameuse de décomposition et de recomposition de l'eau accomplie par Lavoisier le 27 février 1785, à l'Arsenal, devant le ban et l'arrière-ban de l'Académie, des savants étrangers en visite et quelques hauts dignitaires avertis. *« Le public n'est pas constitué de spectateurs passifs : ce sont eux qui authentifient les faits scientifiques et signent un procès-verbal. Il s'agit plus de science en train de se faire que de vulgarisation. »*

Le mot et le principe n'émergent qu'au XIXe siècle, alors que les sciences, devenues appliquées, ne sont plus simplement tenues pour le moyen de comprendre la nature, mais pour le moteur du progrès social. Leur diffusion, profession de foi en leur utilité, entend viser le public le plus large possible. *« La science est un soleil, il faut que tout le monde s'en approche pour se réchauffer et s'éclairer »*, résume Louis Figuier, l'un des grands artisans de la vulgarisation de l'époque. *« Le XIXe siècle est son âge d'or,* indique Daniel Raichvarg. *Elle fait feu de tout bois : expositions universelles, journaux, romans comme ceux de Jules Verne, littérature pour enfants… Elle investit même le théâtre et la poésie* (*« Lavoisier, de deux gaz soupçonnant l'harmonie,/ Aspire à créer l'eau par d'admirables lois. / Oxygène ! Hydrogène ! Accourez à sa voix »*, écrit ainsi le poète d'Adaoust en hommage au chimiste). *C'est aussi l'époque où se développent des conférences pour tous les publics, ainsi que des musées. »* Lesquels commencent par recycler les anciens cabinets de curiosité du roi et de certains nobles, dont les collections de physique atterrissent dans ce qui deviendra le musée des Arts et Métiers, à Paris.

L'essor de la presse et de l'édition porte aussi cette diffusion à grande échelle des ◆◆◆

LAVOISIER, DE DEUX GAZ SOUPÇONNANT L'HARMONIE, ASPIRE À CRÉER L'EAU PAR D'ADMIRABLES LOIS. OXYGÈNE ! HYDROGÈNE ! ACCOUREZ À SA VOIX !

Le poète d'Adaoust en hommage au chimiste qui découvrit la composition de l'eau

◆◆◆ sciences. Les quotidiens généralistes, tels *La Presse, Le Moniteur, Le Constitutionnel* ou *Le Figaro,* publient des feuilletons scientifiques sur les nouvelles découvertes, tandis que le Second Empire voit apparaître les premières revues spécialisées, éphémères ou vouées à une grande postérité, comme *Cosmos* (1852-1940) et *La Nature* (1873 à 1972, date de son absorption par *La Recherche*). Dans l'édition s'illustre notamment la Bibliothèque des Merveilles, première collection de vulgarisation, lancée par Hachette en 1864 et qui perdurera jusqu'en 1950. *« La vulgarisation est une vaste opération commerciale,* sourit Bernadette Bensaude-Vincent. *Elle a conditionné, avec la littérature, le développement du livre au XIXe siècle. Les grandes maisons d'édition se sont constituées autour de la consommation de masse des sciences et des manuels scolaires qui apparaissent à partir de 1830 et ont un public captif. »*

Entre idéal éducatif, mercantilisme et moralisation de la population

La propagation des sciences se retrouve ainsi au carrefour de divers enjeux, entre idéal éducatif et mercantilisme, mais aussi… moralisation de la population. Parmi les sujets des conférences que propose l'Association polytechnique à destination d'un public populaire figure ainsi l'alcoolisme. L'édification scientifique participe d'une volonté hygiéniste et d'un contrôle social. *« Le temps que consacre l'ouvrier à cultiver son esprit, il le dérobe à l'oisiveté ruineuse et dissolvante des cafés »*, résume ainsi *Le Monde illustré* en 1858. La tonalité des articles est multiple, en relation avec le public visé.

Mais si les vulgarisateurs de l'époque – scientifiques, enseignants, écrivains et journalistes – cherchent l'audience la plus large, cette diffusion de masse induit un nouveau rapport à la connaissance, plus passif et marqué par la distinction entre producteurs et consommateurs. *« D'une manière générale, on n'attend pas du public qu'il pratique, mais qu'il achète »*, résume Bernadette Bensaude-Vincent. La professionnalisation croissante de la recherche concourt aussi à disqualifier l'amateur éclairé. François Arago, secrétaire de l'Académie des sciences, suscite ainsi des débats houleux lorsqu'il impose l'ouverture des séances de l'institution au public. *« L'Académie a perdu en indépendance ce qu'elle a gagné en vulgarité »*, déplore le physicien Jean-Baptiste Biot. À la mort d'Arago, en 1853, elle interdira toute discussion entre membres et non-membres lors des séances.

L'idée d'un fossé entre le public et les sciences s'affirme au début du XXe siècle, assénée en boucle par les vulgarisateurs, qui justifient par là même leur utilité. Au XIXe siècle, ils étaient pourtant animés de la conviction qu'il existait une continuité entre science et bon sens. Ce changement de posture se nourrit des développements de la physique, avec la théorie de la relativité et la mécanique quantique dont les principes défient le sens commun. Pour combler ce fossé, qu'elle extrapole à toutes les sciences, la vulgarisation, fidèle à son éclec-

Un des pionniers de la vulgarisation scientifique, le magazine *Je sais tout,* commentera l'actualité de 1905 à 1939.

© GUSMAN / BRIDGEMAN IMAGES

Les baladins de la science

Dès le XVIIIe siècle, l'enthousiasme pour les sciences déborde des cercles mondains. Des scientifiques, démonstrateurs itinérants, circulent d'un pays à l'autre dans les châteaux, les académies de province, mais aussi les rues de Londres, Paris ou Amsterdam, pour échanger avec des savants de tous milieux et présenter à la population ébahie les dernières découvertes. Comme dans les cercles lettrés, l'électricité suscite l'engouement le plus fort. Les bouteilles de Leyde deviennent une attraction sur les champs de foire du milieu du XVIIIe siècle jusqu'à la fin du XIXe siècle, avant qu'elles ne soient éclipsées par des démonstrations de rayons X. *« Ces divertissements disparaîtront après la Première Guerre mondiale*, précise Daniel Raichvarg, *car la science se vendra autrement dans les fêtes foraines : elle sera intégrée dans les dispositifs des manèges. »*

tisme, s'appuie sur une multitude d'expédients. À côté des classiques revues comme *La Science et la Vie*, lancée en 1913, ou *Sciences et Avenir*, en 1947, et des musées tels le Palais de la découverte ou le musée de l'Homme inaugurés en 1937, elle s'engouffre bientôt dans les nouveaux médias : radio, cinéma, télévision et, plus récemment, réseaux sociaux, avec blogs et chaînes de vulgarisation sur YouTube.

Toutefois, la nature de l'entreprise a profondément changé. *« Au XIXe siècle, la science devait améliorer le monde. À partir du XXe siècle, avec les gaz de combat, puis la bombe atomique, on comprend qu'elle peut aussi le détruire »*, résume Daniel Raichvarg. Dès les années 1950, en réaction aux applications militaires de leur discipline, ce sont du reste des physiciens nucléaires qui appellent à faire de la « science pour les gens », tournée vers l'intérêt général, et à ouvrir le débat sur ses applications. Les sciences sociales vont rapidement creuser le sillon. Elles dénoncent le fossé entre public et science théorisé par les vulgarisateurs comme résultant non pas de la science elle-même, mais d'une approche sacralisée et dogmatique de celle-ci, et remettent en cause la vision idéalisée d'un progrès scientifique inéluctable.

Plus récemment, la mobilisation de groupes citoyens, notamment dans des comités de contre-expertise autour du nucléaire ou des OGM, a aussi fait bouger les lignes. En outre, l'injonction politique à la démocratisation des sciences – en France, la vulgarisation fait partie des obligations des chercheurs depuis 2005 et donne lieu à des budgets qui lui sont spécialement consacrés – a achevé de bousculer les anciennes postures. D'où l'essor, depuis la fin du XXe siècle, d'une nouvelle forme de diffusion, fondée sur un impératif de sciences citoyennes, favorisant le débat entre les chercheurs et la population et associant cette dernière à la production des connaissances scientifiques. Le développement des sciences participatives – des programmes de recherche auxquels tout un chacun peut contribuer en partageant ses observations – s'inscrit dans ce mouvement. Elles tendent à réactiver la figure de l'amateur éclairé, même si elles fournissent aussi *« une main-d'œuvre gratuite pour accumuler des données »*, nuance Bernadette Bensaude-Vincent. Débats et conférences organisés par les cafés des sciences, les universités et les musées, comme la Cité des sciences et de l'industrie à Paris, constituent autant de déclinaisons d'une nouvelle sociabilité autour de la recherche. De même que les blogs de chercheurs, animés par la volonté de montrer une science en train de se faire, lieu de controverses et de doutes plus que de hautaines certitudes. Dans cette effervescence, la physique connaît un destin quelque peu paradoxal. Son inscription dans le paysage n'a jamais été aussi monumentale, témoin l'accélérateur de particules du Cern. Pourtant, loin des spectaculaires mises en scène du XVIIIe siècle, les objets de ses recherches n'ont jamais été si discrets, à l'image de l'évanescent boson de Higgs.

MARIE-AMÉLIE CARPIO

VINCENT LELOUP / DIVERGENCE

Les programmes de science participative redonnent aujourd'hui aux amateurs un rôle dans la recherche en train de se faire, comme ici, où des bénévoles comptent et baguent des oiseaux dans la forêt de Fontainebleau.

Daniel Raichvarg, Jean Jacques, *Une histoire de la vulgarisation des sciences* Seuil, 2003

Bernadette Bensaude-Vincent, *L'Opinion publique et la science,* La Découverte, 2013

Philippe Poirrier (dir.), *Histoire de la culture scientifique en France,* Éditions universitaires de Dijon, 2016

LA PHYSIQUE DANS 30 ANS...

BERNARD MARTINEZ

Bernadette Bensaude-Vincent
Professeur émérite de philosophie des sciences

Je vois les physiciens se mettre au service d'autres sciences plus utiles pour la société, comme les chimistes autrefois. C'est déjà le cas aujourd'hui. Nombre d'entre eux vont travailler dans la biologie, où leur expertise est requise dans les biotechnologies. Ils sont aussi beaucoup à s'orienter vers les sciences du climat et de la biodiversité. Les physiciens continueront à aller travailler dans ces disciplines ou dans d'autres domaines comme le traitement des déchets, plutôt que dans la recherche fondamentale en physique où les crédits diminuent comme peau de chagrin, car il existe d'autres urgences pour la société. Même la physique expérimentale telle qu'elle est mise en œuvre dans les grands accélérateurs de particules, comme le cyclotron du plateau de Saclay, est au service d'autres sciences comme la biologie ou l'archéologie, où elle est mobilisée pour analyser des vestiges antiques. Plus le temps passera, plus on observera une diaspora des physiciens dans les autres sciences, en lien avec des enjeux d'actualité. On est loin de la physique reine des sciences du XXe siècle. Elle est toujours indispensable, mais elle ne représente plus le savoir ultime.

PROPOS RECUEILLIS PAR M.-A. C.

PAGE RÉALISÉE PAR MARIE PARRA

La vulgarisation dans tous ses états

USI EVENTS

La passion de Julien Bobroff pour la vulgarisation vient de lui valoir la médaille de la médiation scientifique du CNRS.

Titulaire de la chaire « La physique autrement » à l'université de Paris-Saclay depuis 2013, le physicien Julien Bobroff s'attache à explorer toutes les formes de médiation scientifique et d'enseignement. Ce blog, créé avec son équipe du laboratoire de physique des solides à Orsay et des étudiants, s'inscrit dans un programme de vulgarisation plus global : conférences, expositions et projets pédagogiques. Les « cours », d'une à dix minutes chacun, abordent des concepts complexes à l'aide de métaphores et de matériaux finement choisis. Ainsi une machine en bois s'éveille et permet de visualiser les ondes sonores, lumineuses et mécaniques. Des tissus animés matérialisant les fondements de chaque théorie illustrent l'histoire des principales découvertes en physique. Une autre vidéo interroge la capacité des scientifiques à rendre un objet invisible à partir d'un enchaînement de photos. Chaque thème bénéficie d'un traitement particulier : noir et blanc, caméra subjective, théâtre… L'équipe développe des outils et des ateliers pour rendre la physique vivante et ludique. Dans le cadre du projet « Apprendre autrement », ceux-ci sont testés auprès d'étudiants de la faculté des sciences de l'université Paris-Saclay et de l'institut Villebon.

sciav.fr/la-physique-autrement

DAVID LOUAPRE

Science étonnante, le blog de David Louapre, allié à sa chaîne Youtube, ou le plaisir de faire comprendre le monde…

Tout s'explique !

Qu'est-ce qu'une superposition quantique ? Pourquoi les supraconducteurs font-ils léviter ? Ou encore, combien économise-t-on en roulant à 110 km/h au lieu de 130 sur l'autoroute ? Face à la caméra, David Louapre, chercheur en physique, explore la matière et ses secrets en s'appuyant sur des schémas très accessibles. Il s'attaque aussi bien aux phénomènes quotidiens qu'aux grandes théories… sans oublier la mécanique quantique. Le champ d'investigation de cet insatiable vulgarisateur s'étend même aux mathématiques, à l'informatique ou à la psychologie. Ses vidéos s'adressent à tout un chacun possédant quelques connaissances minimales. Et malgré la complexité apparente des sujets, il parvient à nous faire comprendre leurs mécanismes. Quelle satisfaction !

scienceetonnante.com

Physique à tout âge

À raison d'un numéro par trimestre, la Société française de physique (SFP) – qui fête ses 150 ans cette année – traite en profondeur une thématique dans sa revue *Reflets de la physique.* De l'exploration de Mars au champ géomagnétique de la Terre, les articles consultables en ligne demandent un solide bagage scientifique. *Le Rayon* est plus accessible : dans ce blog, les sujets sont destinés à un public plus jeune, le ton est plus léger, le vocabulaire simplifié… mais toujours d'une grande rigueur. Quelques exemples : la physique d'un verre d'eau, l'origine des champs magnétiques de l'Univers, la mécanique du tricot – ou comment un objet se déforme quand on le tire en tous sens…

sciav.fr/refletsdelaphysique
jeunes.sfpnet.fr

De van Gogh aux étoiles

Dans ce blog unique en son genre, l'astrophysicien Jean-Pierre Luminet – qui est aussi musicien et mélomane – tisse des liens entre science et arts. Il détaille par exemple les recherches effectuées par l'astronome américain Donald Olson pour identifier l'endroit exact d'où van Gogh a peint ses *Nuits étoilées*, ou propose une série de billets intitulée « Franz Liszt dans les étoiles ». Dans un registre plus classique mais toujours teinté de poésie, ses « Chroniques de l'espace illustrées » retracent la fabuleuse épopée de l'exploration spatiale.

sciav.fr/luminesciences

À LIRE

Julien Bobroff, *Bienvenue dans la nouvelle révolution quantique*, Flammarion, 2022

Clifford A. Pickover, *Le Beau Livre de la physique,* Dunod, 2021

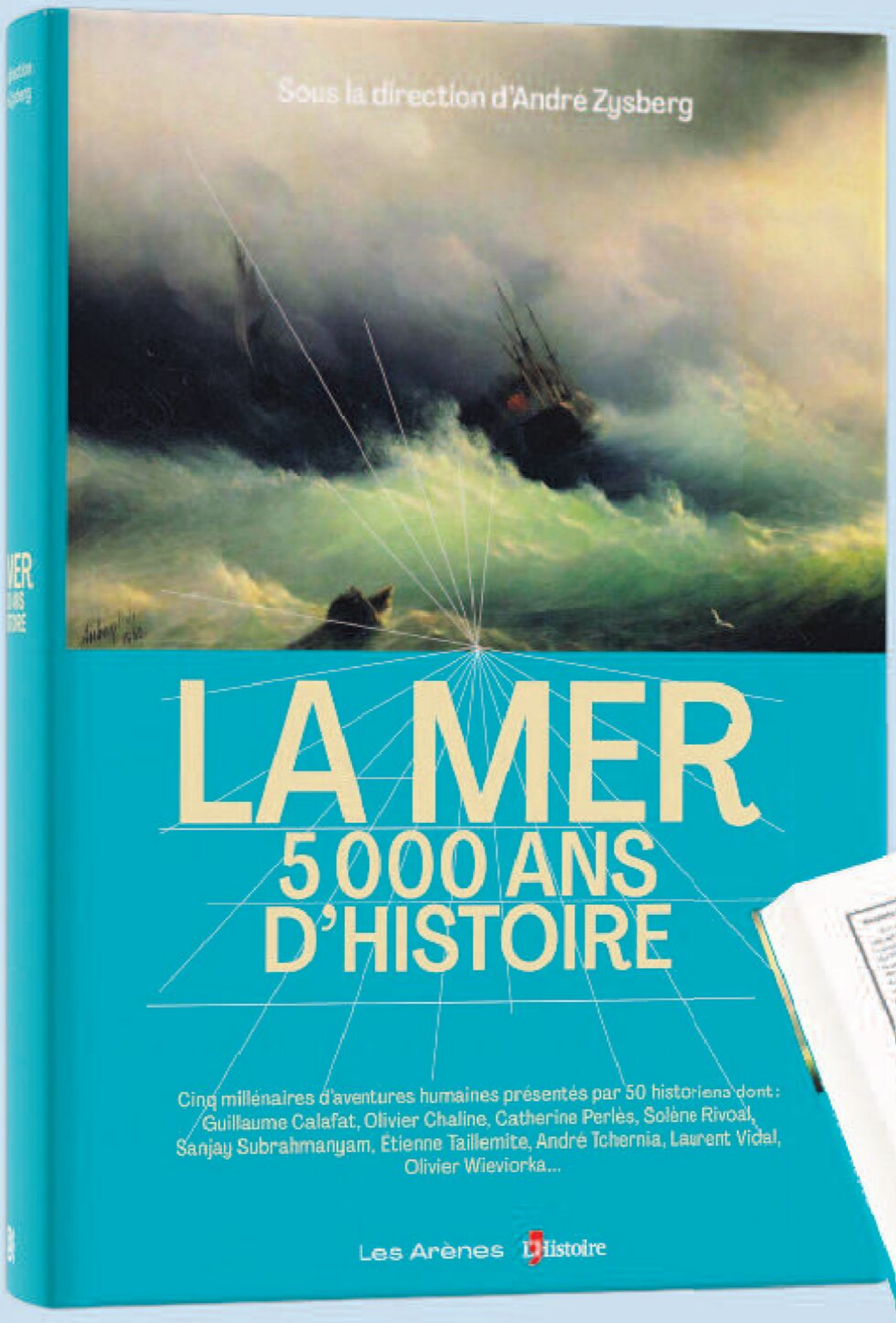
Jean-Marc Ginoux, *Les Grandes Découvertes de l'histoire de la physique et leurs démonstrations,* Ellipses, 2018

Pierre Spagnou, *Déjouez les idées fausses en physique,* Ellipses, 2017

Adam Hart-Davis, *Le Chat de Schrödinger. 50 expériences qui ont révolutionné la physique,* Larousse, 2016

ÉVÉNEMENT !
en librairie le 13 octobre

Tout sur la mer par les meilleurs spécialistes



50 historiens et historiennes dont notamment :

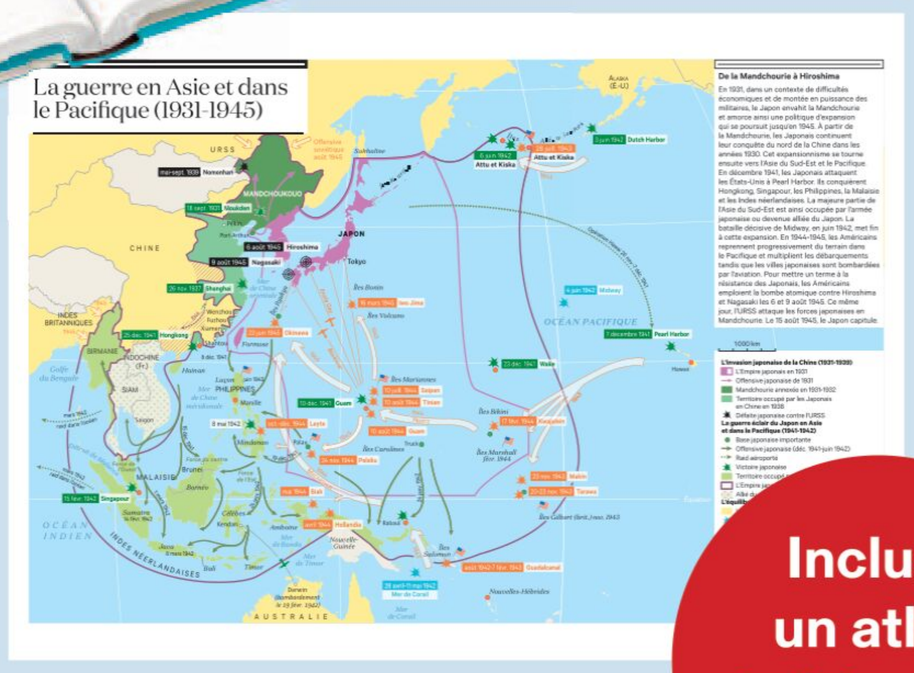
Guillaume Calafat,
Olivier Chaline,
Catherine Perlès,
Solène Rivoal,
Sanjay Subrahmanyam,
Étienne Taillemite,
Sylvain Venayre,
Laurent Vidal,
Olivier Wieviorka,
André Zysberg...

Une édition de luxe avec couverture reliée et jaquette

592 pages - 29,90€

La Mer, 5000 ans d'histoire interroge les liens que les sociétés humaines ont tissés avec la mer. Comment les hommes n'ont eu de cesse de s'approprier la mer par le voyage, le commerce, la pêche, la guerre, mais aussi comment, en retour, la mer a nourri les imaginaires et les croyances, influencé les modes de vie. Comment s'est structuré notre rapport à cette nature indomptable, nourricière et menacée.

Sélectionnés parmi les meilleurs articles de la revue *L'Histoire*, ces textes couvrent l'ensemble des périodes historiques : des premiers navigateurs du Néolithique aux nouveaux pirates de la mer Rouge en passant par les thalassocraties antiques et les Grandes Découvertes.



Inclus : un atlas de 64 pages en couleur

Sommaire

1. L'art de la navigation
2. Explorateurs et aventuriers
3. Vivre sur la mer
4. La guerre maritime
5. Thalassocraties et empires maritimes
6. Un milieu riche en ressources
7. Mythes et légendes

L'Histoire Les Arènes

RIVAGES
DU MONDE

Voguer. Échanger. Rêver

RCS Paris B 438 679 664 – 150 000 euros - Atout France IM 075 100 099 – Crédit Dreamstime

Croisière

Madère et l'archipel des Açores

D'avril à mai 2023

À bord du World Explorer, un yacht luxueux pour 180 passagers, mettez le cap sur l'Atlantique. Découvrez, sous un climat subtropical, des îles mystérieuses et paradisiaques sculptées par l'activité volcanique.

SA07

Découvrez la croisière :

RÉSERVEZ VOTRE CROISIÈRE AU 01 83 96 85 03 OU SUR WWW.RIVAGESDUMONDE.FR